



Luís Filipe Alves Teixeira

Licenciatura pré-bolonha em Eng. do Ambiente

**Validação de Técnicas de Prospeção
Geoelectrica para a Detecção de Água
Subterrânea em Rochas Vulcânicas
na Ilha Terceira, Açores**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia do Ambiente,
perfil de Gestão de Sistemas Ambientais

Orientador: Pedro Santos Coelho, Prof. Auxiliar, UNL-FCT

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António Pedro de Nobre Carmona Rodrigues
Arguente: Prof. Doutora Maria Manuela Simões Ribeiro
Vogal: Prof. Doutor Pedro Manuel da Hora Santos Coelho



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Abril de 2012

Validação de Técnicas de Prospecção Geoelétrica
para a Detecção de Água Subterrânea em Rochas Vulcânicas
na Ilha Terceira, Açores

Indicação de “Copyright ©”

Luís Filipe Alves Teixeira, FCT/UNL e UNL

“A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.”

À minha esposa Eduarda

Agradecimentos

Ao Prof. Doutor Pedro Santos Coelho, pela preciosa orientação e disponibilidade com que sempre me acompanhou ao longo da realização desta dissertação.

À Praia Ambiente E.M., na pessoa do Eng. Vasco Rocha, pela cedência de dados sobre o furo de captação F12 das Fajãs da Agualva, fundamental para a realização desta tese.

Aos Serviços Municipalizados de Angra do Heroísmo, na pessoa do Eng. Humberto Bettencourt, pela cedência de dados sobre o furo de captação SB3-Achada e o furo de monitorização SB-P1/AH, fundamentais para a realização desta tese.

Ao grande amigo Ivo Leite, por me acolher na sua casa, sempre que precisei de me deslocar a Lisboa, no âmbito deste trabalho.

À Eduarda, minha esposa, por todo o amor, motivação e compreensão nos momentos mais difíceis dessa etapa da minha vida.

A todos um muito obrigado.

Resumo

O trabalho realizado teve como principal objectivo avaliar se a aplicação de técnicas de prospecção geoelectrica, com o intuito de detectar massas de água subterrânea, é válida em rochas vulcânicas.

São apresentados dois casos de estudo, nos quais se utilizaram técnicas de prospecção geoelectrica em rochas de origem vulcânica, na ilha Terceira - Açores; bem como a caracterização de três furos, dois de captação de água e um de monitorização da qualidade da água subterrânea.

De modo a aferir a fiabilidade dos resultados apresentados nos dois casos de estudo, e para validar o método geoelectrico em solos vulcânicos, foi feita uma correlação entre os *logs* dos furos e as sondagens eléctricas verticais mais próximas.

No caso de estudo I, cujo objectivo foi localizar massas de água subterrânea para consumo humano, foram efectuadas oito sondagens eléctricas verticais com o método Schlumberger, que indicaram a melhor zona para a localização de um furo de captação.

No caso de Estudo II, cujo objectivo foi servir de complemento a um estudo geológico e geotécnico de um aterro sanitário, foram efectuadas duas sondagens eléctricas verticais com o método Schlumberger, que indicaram, com base numa das duas sondagens, a existência de um aquífero.

As sondagens eléctricas verticais, nos dois casos de estudo, mostram capacidade para distinguir, em rochas vulcânicas heterogéneas, camadas com diferentes resistividades em função do grau de saturação.

Na comparação entre os furos de água subterrânea e os resultados obtidos nos casos de estudo, demonstrou-se existir uma boa correlação entre os *logs* dos furos e as sondagens eléctricas verticais.

Uma vez estabelecida a referida correlação entre as sondagens e os furos de captação, foi possível calcular o Factor de Formação para as litologias presentes nas camadas saturadas dos furos. Deste modo, foram calculados valores de Factor de Formação de 7.00 para basaltos alterados, de 7.59 para basaltos fracturados com bagacina e de 9.12 para depósitos de piroclastos.

Concluiu-se, de acordo com os resultados obtidos na análise da correlação entre as sondagens eléctricas verticais dos dois casos de estudo e os furos de captação, que a aplicação de técnicas de prospecção geoelectrica com o objectivo de detectar massas de água subterrânea é válida para rochas vulcânicas.

Abstract

The propose of this study is to verify if the use of geoelectrical methods for groundwater exploration can be applied at volcanic rocks.

Two case studies were presented, in which geoelectrical methods were applied on volcanic rocks at Terceira Island – Azores, as well as, the characterization of three wells, two for groundwater withdrawal and one for groundwater quality monitoring.

In order to verify the results of both case studies and validate the geoelectrical method at volcanic rocks, a correlation between the well logs and the nearest geoelectrical depth soundings was performed.

In case study I, which propose was to find groundwater resources for human consumption, a total of eight geoelectrical depth soundings using Schlumberger method were conducted, which indicated the best location for a groundwater well.

In case study II, used as a complement for a geotechnical study at a sanitary landfill, two geoelectrical depth soundings using Schlumberger method were conducted and one of the soundings detected an aquifer.

The geoelectrical depth soundings, presented in both case studies, allowed a distinction between freshwater saturated layers and high resistivity unsaturated layers; at volcanic rocks, which presents, lithologic formations with large heterogeneity.

Regarding the comparison between the groundwater wells and the results of both case studies, it was showed that correlation exists between the well logs and the geoelectrical depth soundings.

Once it was establish a correlation between the soundings and the groundwater wells, the Formation Factor values for the lithologic formations of the well's saturated layers was calculated. Therefore, it was calculated the follow Formation Factor values: 7.00 for fractured basalts, 7.59 for fractured basalts with lapilli and 9.12 for pyroclastic deposits.

Based on the correlation results between the geoelectrical depth soundings of the case studies and the data for groundwater wells, it was concluded that the use of geoelectrical methods for groundwater exploration can be applied at volcanic rocks.

Índice de matérias

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract	ix
Índice de figuras	xv
Índice de tabelas	xvii
1- Introdução	1
2- Princípios e fundamentação do método geoelectrico na prospecção de água subterrânea	3
2.1- Resistividade e condutividade eléctrica – Lei de Ohm.....	3
2.2- Relação entre a condutividade eléctrica e a mineralização da água - relação com qualidade da água	5
2.2.1- Efeito da temperatura na resistividade de água subterrânea.....	6
2.2.2- Efeito de soluções ácidas e básicas em comparação com sais minerais na condutividade da água subterrânea	7
2.3- Resistividade eléctrica total de rochas e minerais (resistividade bulk)	8
2.4- Influência de parâmetros hidráulicos na resistividade eléctrica de rochas	12
2.4.1- Corrente eléctrica através da água nas rochas e da porosidade	13
2.4.2- Factor de Formação (F)	15
2.5- Prospecção geoelectrica.....	16
2.5.1- Princípios gerais das medições geoelectricas	16
2.5.2- Tipos de configuração dos eléctrodos	17
2.5.2.1- Método Schlumberger.....	18
2.5.2.2- Método Wenner	19
2.5.3- Equipamento de prospecção geoelectrica.....	20
2.5.4- Fontes de ruído eléctrico	23
2.5.5- Interpretação de Sondagens Eléctricas Verticais com modelos	24
2.5.5.1- Problema de não – singularidade	27
2.5.5.2- Efeito de resistividade lateral.....	27
2.5.5.3- Deslocação da curva de campo	28
2.5.6- Sondagem eléctrica vertical paralela a uma linha costeira.....	29
2.6- Importância de informação adicional na interpretação das sondagens eléctricas verticais ..	31
2.7- Aplicações do método geoelectrico	31
3- Caso de Estudo I: <i>Prospecção Geoelectrica para a detecção de massas de água subterrânea na zona das Fajãs Praia da Vitória</i>	35
3.1- Introdução.....	35

3.2- Caracterização da zona de estudo	35
3.2.1- Enquadramento geomorfológico	35
3.2.2- Enquadramento geológico e tectónico.....	36
3.3- Prospeção Geoeléctrica.....	39
3.3.1- Trabalhos de Campo.....	39
3.3.1.1- Equipamento	39
3.3.1.2- Localização	39
3.3.1.3- Procedimentos.....	41
3.3.1.4- Condicionantes.....	41
3.3.1.5- Interpretação das sondagens eléctricas verticais	41
3.3.2- Relação entre a qualidade da água e a resistividade de uma camada saturada.....	49
3.4- Discussão de um modelo hidrogeológico para a zona	50
3.5- Sumário e Conclusões.....	52
4- Caso de Estudo II: <i>Estudo Geológico e Geotécnico da Zona de Construção da 8.ª Célula do Aterro Intermunicipal da Ilha Terceira</i>	55
4.1- Introdução.....	55
4.2- Caracterização da zona de estudo	56
4.2.1- Enquadramento geomorfológico	56
4.2.2- Enquadramento geológico e tectónico.....	56
4.3- Prospeção Geoeléctrica.....	60
4.3.1- Trabalhos de Campo.....	60
4.3.1.1- Equipamento	60
4.3.1.2- Localização	60
4.3.1.3- Procedimentos.....	62
4.3.1.4- Condicionantes.....	62
4.3.1.5- Interpretação das sondagens eléctricas verticais	62
4.3.2- Relação entre a qualidade da água e a resistividade de uma camada saturada.....	65
4.3.3- Síntese	65
5- Correlação entre Caso de Estudo I e dois Furos de captação.....	67
5.1- Introdução.....	67
5.2- Caracterização dos Furos de Captação	68
5.2.1- Furo F12 das Fajãs da Agualva	68
5.2.1.1- Localização	68
5.2.1.2- Log do furo.....	69
5.2.1.3- Ensaio de Caudal.....	70
5.2.2- Furo SB3-Achada.....	71
5.2.2.1- Localização	71

5.2.2.2- <i>Log</i> do furo.....	72
5.2.2.3- Ensaio de Caudal	73
5.3- Correlação entre os Furos e as sondagens eléctricas verticais.....	73
5.3.1- Cálculo do Factor de Formação (F).....	76
6- Correlação entre Caso de Estudo II e Furo SB-P1/AH do Aterro.....	79
6.1- Introdução.....	79
6.2- Caracterização do Furo SB-P1/AH.....	80
6.2.1- Localização	80
6.2.2- <i>Log</i> do furo.....	81
6.2.3- Ensaio de Caudal.....	82
6.3- Correlação entre o Furo e as sondagens eléctricas verticais.....	82
6.3.1- Cálculo do Factor de Formação (F).....	83
7- Conclusões	85
Referências Bibliográficas	87

Índice de figuras

Figura 2.1: Resistividade eléctrica através de um bloco homogéneo com uma corrente aplicada I e diferença de potencial V entre duas faces opostas	4
Figura 2.2: Efeito da temperatura na condutividade eléctrica de uma solução de cloreto de sódio..	6
Figura 2.3: Dependência da condutividade eléctrica de soluções de sais, ácidos e bases mais comuns à temperatura de 18 °C.....	7
Figura 2.4: Valores típicos de resistividade para diferentes materiais rochosos.....	9
Figura 2.5: Arranjo linear AMNB com uma configuração de quatro eléctrodos.....	16
Figura 2.6: Configuração dos eléctrodos no método Schlumberger	18
Figura 2.7: Configuração dos eléctrodos no método Wenner.....	19
Figura 2.8: Esquema de um eléctrodo não polarizado	21
Figura 2.9: Disposição dos equipamentos necessários para uma medição geolétrica com o método Schlumberger	22
Figura 2.10: Quatro modelos tipos de curvas de 3 camadas	25
Figura 2.11: Sondagem eléctrica vertical numa zona costeira industrial.....	26
Figura 2.12: Resistividade medida para espaçamentos AB e AB' com as distancias MN e MN' ..	28
Figura 2.13: Curva SEV com o efeito de deslocação	29
Figura 2.14: Método de imagem aplicado a uma sondagem eléctrica vertical paralela a uma zona costeira	29
Figura 3.1: Localização da zona de estudo	37
Figura 3.2: Carta geológica da zona de estudo	38
Figura 3.3: Localização das sondagens eléctricas verticais	40
Figura 3.4: Sondagem eléctrica vertical PA 1, com a curva modelo mais coincidente e o respectivo modelo.....	42
Figura 3.5: Sondagem eléctrica vertical PA 2, com a curva modelo mais coincidente e o respectivo modelo.....	43
Figura 3.6: Sondagem eléctrica vertical PA 3, com a curva modelo mais coincidente e o respectivo modelo.....	44
Figura 3.7: Sondagem eléctrica vertical PA 4, com a curva modelo mais coincidente e o respectivo modelo.....	45
Figura 3.8: Sondagem eléctrica vertical PA 5, com a curva modelo mais coincidente e o respectivo modelo.....	46
Figura 3.9: Sondagem eléctrica vertical PA 5A, com a curva modelo mais coincidente e o respectivo modelo	46

Figura 3.10: Sondagem eléctrica vertical PA 6, com a curva modelo mais coincidente e o respectivo modelo	47
Figura 3.11: Sondagem eléctrica vertical PA 7, com a curva modelo mais coincidente e o respectivo modelo	48
Figura 3.12: Localização de massas de água subterrânea com diferentes níveis piezométricos.....	51
Figura 4.1: Localização da zona de estudo	57
Figura 4.2: Enquadramento tectónico da zona de estudo.....	58
Figura 4.3: Carta geológica da zona de estudo	59
Figura 4.4: Localização das sondagens eléctricas verticais	61
Figura 4.5: Sondagem eléctrica vertical AT 1, com a curva modelo mais coincidente e o respectivo modelo.....	63
Figura 4.6: Sondagem eléctrica vertical AT 2, com a curva modelo mais coincidente e o respectivo modelo.....	64
Figura 5.1: Localização do Furo F12 das Fajãs da Agualva	68
Figura 5.2: <i>Log</i> do furo F12 das Fajãs da Agualva.	69
Figura 5.3: Localização do Furo SB3-Achada.....	71
Figura 5.4: <i>Log</i> do furo SB3-Achada.....	72
Figura 5.5: Sondagem eléctrica vertical PA 1, com a curva modelo do caso de Estudo I e a curva modelo adaptada ao <i>log</i> do furo.	75
Figura 6.1: Localização do Furo SB-P1/AH.....	80
Figura 6.2: <i>Log</i> do furo SB-PA1/AH.	81

Índice de tabelas

Tabela 2.1: Resistividade de rochas em função da presença de água	9
Tabela 2.2: Resistividade de diferentes tipos de rochas vulcânicas e de águas	10
Tabela 2.3: Resistividade de rochas vulcânicas e materiais nelas contidas	10
Tabela 2.4: Resistividade de rochas vulcânicas e dos materiais que as constituem.....	11
Tabela 2.5: Resistividade de rochas vulcânicas e materiais afins	11
Tabela 2.6: Resistividade de rochas vulcânicas	12
Tabela 2.7: Resistividade de rochas vulcânicas e materiais nelas contidas	12
Tabela 2.8: Constantes da equação de Archie que podem ser usadas quando a litologia da rocha é conhecida.....	14
Tabela 2.9: Uso da equação de Archie para estimar a resistividade total	14
Tabela 3.1: Coordenadas UTM e altitude das sondagens eléctricas verticais.....	39
Tabela 3.2: Valores de resistividade eléctrica, profundidade, espessura e nível piezométrico das camadas saturadas geradas pelos modelos	49
Tabela 4.1: Coordenadas UTM e altitude das sondagens eléctricas verticais.....	60
Tabela 5.1: Profundidades e níveis piezométricos das sondagens eléctricas verticais e dos Furos F12 das Fajãs da Agualva e SB3-Achada	74
Tabela 5.2: Factor de Formação calculado com as análises das águas dos furos e as camadas saturadas da SEVs PA 1 e PA 7	77
Tabela 6.1: Profundidades e níveis piezométricos da sondagem eléctrica vertical e do Furo SB-PA1/AH.....	82
Tabela 6.2: Factor de Formação calculado com as análises da água do furo e a camada saturada da SEV AT 2.....	83

1- Introdução

A presente dissertação, elaborada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, perfil de Gestão de Sistemas Ambientais, pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, tem como principal objectivo avaliar, a aplicação de técnicas geoeléctricas na prospecção de água subterrânea, em rochas vulcânicas.

A metodologia adoptada suportou-se na comparação dos resultados de dois casos de estudo, em que se utilizaram técnicas de prospecção geoeléctrica para a localização de massas de água subterrânea em rochas vulcânicas. Consideraram-se três furos, sendo dois de captação de água e um de monitorização, e verificou-se a correlação entre as medições geoeléctricas e os dados inerentes aos referidos furos.

O método geoeléctrico é um método geofísico de baixo custo e não evasivo do Ambiente, que mede a resistividade ou condutividade eléctrica de materiais do subsolo. É baseado na teoria de um potencial eléctrico a três dimensões, sendo possível determinar as resistividades eléctricas e espessuras reais de camadas no subsolo através de interpretações de medições feitas à superfície. Isto é conseguido criando curvas modelo que são comparadas com as curvas obtidas no terreno.

O método é utilizado em diversas aplicações, especialmente na pesquisa de água subterrânea e na localização de plumas de contaminação, por ser possível detectar o contraste da resistividade eléctrica entre camadas saturadas e não saturadas.

Através da compilação das ciências de Geofísica, Hidrologia e Hidrogeologia é possível estimar parâmetros hidráulicos a partir da resistividade eléctrica de camadas do subsolo. Uma vez que existem muitos parâmetros hidráulicos que influenciam a resistividade eléctrica, correctas interpretações de resultados geoeléctricos são possíveis quando se fazem correctas validações, que são empíricas e muitas vezes específicas para cada local. Essas validações são mais correctas se forem confirmadas com testes, em furos localizados em condições hidrogeológicas semelhantes.

O presente documento é constituído por sete capítulos: a presente introdução; o capítulo 2 (revisão bibliográfica), onde se realiza a revisão do estado actual dos conhecimentos e das aplicações; os capítulos 3 e 4, onde se apresenta cada um dos casos de estudos, bem como os correspondentes resultados e conclusões; os capítulos 5 e 6, onde se efectua a correlação entre cada caso de estudo e os furos de captação; e o capítulo 7, onde são apresentadas as conclusões.

2- Princípios e fundamentação do método geoelectrico na prospecção de água subterrânea

2.1- Resistividade e condutividade eléctrica – Lei de Ohm

O principal princípio da resistividade eléctrica é muito simples. Uma corrente eléctrica é aplicada à superfície da terra e é medida a diferença de potencial entre dois pontos. Isso determina a resistividade eléctrica do material geológico, e pode permitir determinar que tipo de material rochoso está presente. A resistividade eléctrica é uma das propriedades das rochas que varia de acordo com o tipo de rocha, conteúdo de argila, porosidade, condutividade da superfície das partículas das rochas e da qualidade e quantidade de água contida nas rochas. A resistividade eléctrica dos diversos materiais rochosos da terra varia bastante, desde $10^{-6} \Omega.m$ para o Grafite até $10^{12} \Omega.m$ para o Quartzo (Fetter, 1994).

A resistividade eléctrica é definida pela lei de Ohm. George Simon Ohm provou que a voltagem ou diferença de potencial (V) e a corrente eléctrica (I) são linearmente relacionadas, onde a quantidade de corrente é controlada pela resistência (R):

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.1)$$

A corrente é directamente proporcional à voltagem e inversamente proporcional à resistência. De acordo com a lei de Ohm (eq. 2.1) a resistência eléctrica é determinada pela razão entre a diferença de potencial entre os dois extremos de um material e a intensidade da corrente eléctrica aplicada (Zhdanov e Keller, 1994).

Em prospecção geoelectrica a noção de resistência não faz muito sentido, porque a resistência de um condutor eléctrico é afectada pelo seu comprimento e área. Deste modo, dois condutores eléctricos de diferentes comprimentos e do mesmo material, não terão o mesmo valor de resistência; do mesmo modo que dois condutores de diferentes materiais e mesmo comprimento não terão a mesma resistência (Zhdanov e Keller, 1994).

Porque a resistência depende da geometria dos corpos geológicos, há uma propriedade que é independente da geometria do corpo por onde passa a corrente, e que permite uma maior fiabilidade na caracterização da corrente eléctrica. Essa propriedade é a resistividade eléctrica.

A resistividade eléctrica (ρ) é relacionada com resistência de acordo com a seguinte equação:

$$R = \rho \cdot \left(\frac{L}{A} \right) \quad (2.2)$$

sendo L e A , respectivamente, o comprimento e a área da secção perpendicular ao sentido da corrente eléctrica, e ρ a resistividade eléctrica, se considerar um cubo uniforme de comprimento (L) por onde para a corrente (I) (Figura 2.1) (Zhdanov e Keller, 1994).

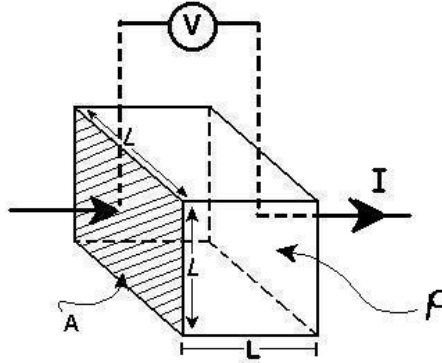


Figura 2.1: Resistividade eléctrica através de um bloco homogêneo com uma corrente aplicada I e diferença de potencial V entre duas faces opostas

Conjugando as equações 2.1 e 2.2, a resistividade eléctrica pode ser dada pela seguinte equação:

$$\rho = \frac{A}{L} \times \frac{\Delta V}{I} \quad (2.3)$$

onde A é a área por onde passa a corrente eléctrica, L o comprimento por onde a corrente passa, ΔV a diferença de potencial e I a corrente eléctrica.

As unidades da resistividade eléctrica dependem das unidades em que são medidas a corrente eléctrica, a diferença de potencial e o comprimento. Com as unidades mais usadas para $[\Delta V]$: mV; $[I]$: mA; $[\Delta V/I]$: Ω ; $[L]$: m; a resistividade eléctrica é medida em Ohm metro ($[\rho]$: $\Omega.m$).

A condutividade eléctrica é o inverso da resistividade eléctrica ($\sigma = 1/\rho$) com a seguinte conversão para a unidade mais utilizada, o micro Siemens por Centímetro:

$$\sigma (\mu S / cm) = \frac{10000}{\rho (\Omega.m)} \quad (2.4)$$

A resistividade eléctrica é mais utilizada que a condutividade para trabalhos de prospecção geoelectrica. Por outro lado, a condutividade é mais usada para fluidos e para a qualidade da água.

2.2- Relação entre a condutividade eléctrica e a mineralização da água - relação com qualidade da água

A água é um condutor de corrente eléctrica, em função dos iões dissolvidos, sob a influência de um campo eléctrico. A condutividade da água é directamente proporcional à concentração de iões em termos de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) e à temperatura. Um aquífero (camada subterrânea saturada com água), devido à condutividade eléctrica da água, é caracterizado por apresentar camadas com baixas resistividades eléctricas (Frohlich, 2000).

A água subterrânea apresenta uma grande variedade de sólidos totais dissolvidos, que aumentam a condutividade eléctrica e diminuem a resistividade eléctrica. Os sólidos dissolvidos na água subterrânea dependem do tempo de residência dos diferentes iões que se encontram presentes. Águas recentemente infiltradas após precipitação, podem apresentar-se muito limpas com condutividades muito baixas entre os 40 e 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Águas com maior tempo de residência e contacto com a rocha, apresentam maior concentração de sais dissolvidos maioritariamente na forma iónica e, consequentemente, condutividades eléctricas maiores (Frohlich, 2000).

Os iões maiores presentes na água que contribuem para a concentração de STD são os cátions cálcio, magnésio, sódio e potássio; e os aniões cloreto, sulfato, carbonato e bicarbonato (Fetter, 1994).

A condutividade eléctrica da água é muitas vezes relacionada com a qualidade da água, a qualidade é baixa se a condutividade da água é elevada devido a uma grande concentração de sólidos totais dissolvidos. Para converter a condutividade da água a um equivalente de concentração de STD em partes por milhão (ppm), a condutividade medida em $\mu\text{S}/\text{cm}$ é multiplicada por uma constante que de acordo com o tipo de iões na água varia entre 0.55 e 0.75 (Frohlich e Urish, 2002).

A condutividade da água para consumo humano normalmente varia entre os 100 e os 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Utilizado a relação anteriormente referida, pode estabelecer-se um limite máximo de condutividade de água para consumo humano, utilizando como referência o limite superior 500 ppm de STD sugeridos pela “*Environmental Protection Agency*” (EPA). Assim, usando o valor médio da constante de 0.65, podem estabelecer-se um limite máximo de condutividade eléctrica de 770 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Frohlich e Urish, 2002).

Como a condutividade eléctrica pode ser facilmente medida, pode ser utilizada para avaliar a qualidade da água, no que se refere à concentração de STD. A poluição antropogénica das águas subterrâneas pode aumentar a concentração de STD acima de valores aconselháveis para água de consumo humano.

2.2.1- Efeito da temperatura na resistividade de água subterrânea

Um aumento na temperatura da água diminui a sua viscosidade e consequentemente os iões na água tornam-se mais móveis. Isso resulta num decréscimo da resistividade eléctrica com o aumento da temperatura de acordo com a seguinte expressão:

$$\rho_t = \frac{\rho_{18}}{1+0.025(t-18)} \quad (2.5)$$

onde 0.025 é o coeficiente de temperatura da resistividade, t é temperatura a que se encontra a massa de água, ρ_t é a resistividade eléctrica àquela temperatura e ρ_{18} é a resistividade de referência medida à temperatura de 18 °C. Com esta equação é possível corrigir a dependência da temperatura na resistividade. Esse efeito contribui para a diminuição de resistividades em sistemas geotérmicos (Frohlich, 2000).

A Figura 2.2 mostra a dependência da condutividade eléctrica com a temperatura numa solução de cloreto de sódio (NaCl), que é o principal sal na maioria das águas subterrâneas. A figura mostra que a condutividade aumenta, para um dado valor de salinidade, com o aumento da temperatura, e a resistividade, sendo o inverso da condutividade, diminui.

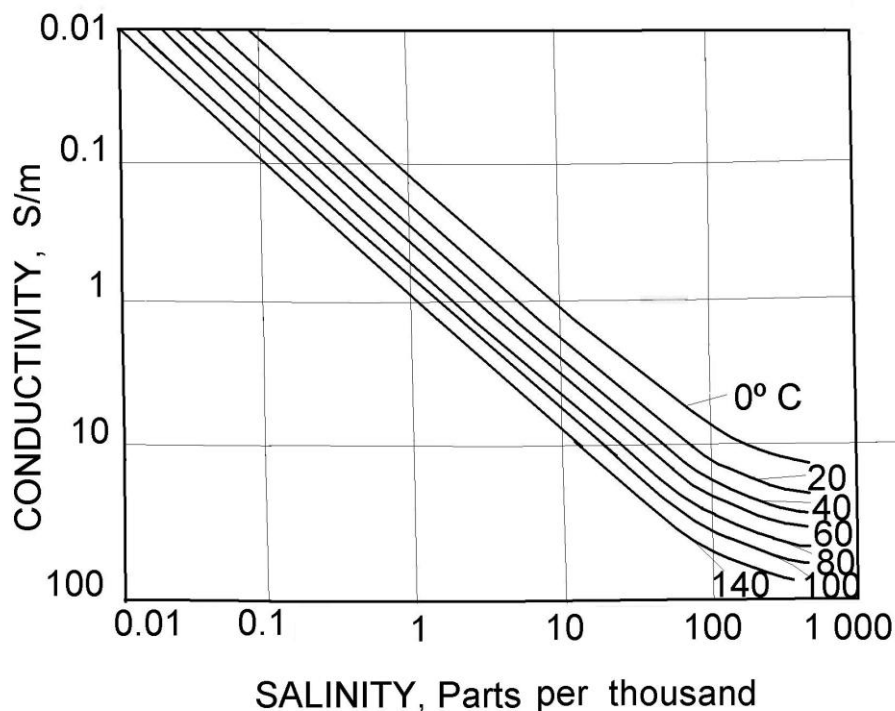


Figura 2.2: Efeito da temperatura na condutividade eléctrica de uma solução de cloreto de sódio (Zhdanov e Keller, 1994)

2.2.2- Efeito de soluções ácidas e básicas em comparação com sais minerais na condutividade da água subterrânea

Ácidos e bases, para determinadas concentrações, são soluções mais condutoras que soluções de sais minerais. As águas subterrâneas são normalmente neutras, por isso, na maioria dos casos não é necessário saber a composição química da água subterrânea para obter um valor aproximado da sua condutividade, mas sim a concentração de sais minerais (Zhdanov e Keller, 1994).

Isso é demonstrado na Figura 2.3, onde as curvas representam a condutividade de concentrações de soluções de sais, ácidos e bases mais comuns a uma temperatura de 18 °C.

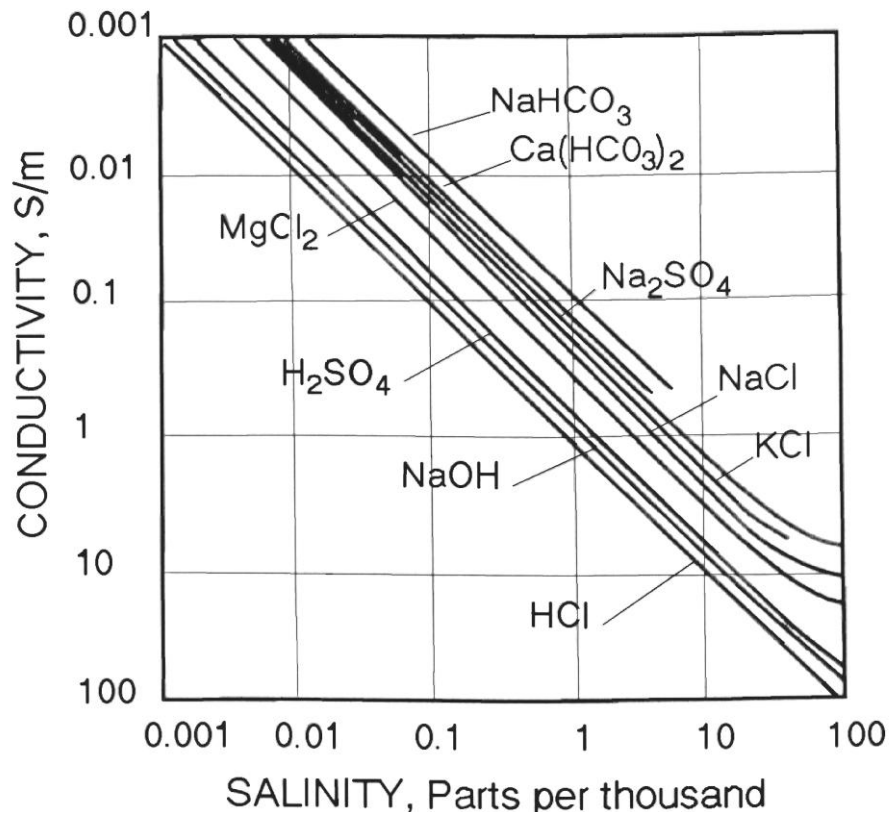


Figura 2.3: Dependência da condutividade eléctrica de soluções de sais, ácidos e bases mais comuns à temperatura de 18 °C (Zhdanov e Keller, 1994)

2.3- Resistividade eléctrica total de rochas e minerais (resistividade bulk)

Uma rocha é um agregado de um ou mais tipos de minerais. As propriedades de uma rocha podem ser uma simples combinação das propriedades dos minerais que a compõem, mas muitas vezes não é esse o caso. A principal causa da complexidade de determinar as propriedades eléctricas das rochas através dos minerais, é a presença de substâncias não minerais, como é o caso da água em quase todas as rochas.

As rochas são bons condutores de corrente eléctrica se os poros estão interligados e preenchidos com água. As rochas têm uma resistividade eléctrica bulk (ρ_b) que depende da resistividade eléctrica da água nos seus poros (função da concentração de STD), do grau de saturação, da porosidade, da quantidade de argila e da própria matriz da rocha (Frohlich, 2000).

A resistividade eléctrica é a propriedade física que apresenta maiores contrastes na geofísica. Como exemplo, a prata têm uma resistividade de $1.6 \times 10^{-8} \Omega.m$ enquanto a resistividade do sulfato é de $10^{16} \Omega.m$, é uma diferença de 10^{24} entre os dois. Essas grandes diferenças na resistividade permitem que os distingamos com maior facilidade, do que através de outros métodos (Giroux, 1999).

Existem três classes de condutores:

- 10^{-8} a $1 \Omega.m$: bons condutores;
- 1 a $10^7 \Omega.m$: condutores intermédios;
- 10^7 a $\infty \Omega.m$: maus condutores.

As resistividades eléctricas de rochas sedimentares são normalmente mais baixas que as de rochas vulcânicas mas, como já foi referido anteriormente, todas dependem da porosidade, da quantidade de argila, da saturação e da concentração de sais na água (Palacky, 1998).

A Figura 2.4 apresenta os valores típicos de resistividade eléctrica para diferentes materiais rochosos. Podemos verificar a grande amplitude de valores. É importante referir que a resistividade eléctrica da água doce pode variar entre 3 e $100 \Omega.m$, que depende da concentração de sais minerais e, como a água salgada apresenta grande concentração de NaCl, os valores de resistividade em relação à água doce caem para os 0.1 a $1 \Omega.m$.

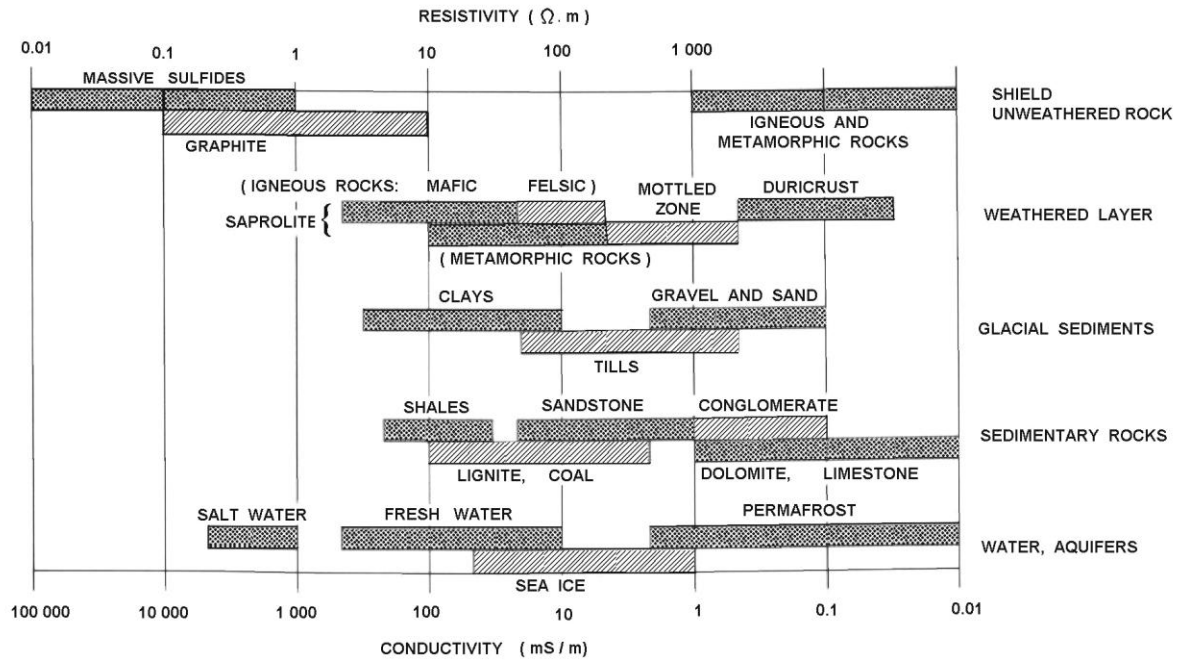


Figura 2.4: Valores típicos de resistividade para diferentes materiais rochosos (Palacky, 1998)

A resistividade eléctrica da matriz do subsolo é principalmente determinada pela presença de água nos poros, por esta ter um grande efeito na condutividade eléctrica. O efeito da presença de água é mostrado na tabela 2.1, a título de exemplo, observando-se um contraste da ordem de 10 000 $\Omega \cdot m$ entre um basalto com 0 % de teor de água e outro com 95 %.

Tabela 2.1: Resistividade de rochas em função da presença de água (Giroux, 1999)

Rocha	H ₂ O (%)	Resistividade ($\Omega \cdot m$)
Basalto	95	400
Basalto	49	1 800
Basalto	26	5 000
Basalto	0	10 400

Na tabela 2.2 é apresentada a resistividade eléctrica de vários tipos de rochas vulcânicas e de vários tipos de água segundo alguns autores (Giroux, 1999). A grande amplitude que se encontra em alguns casos tem a ver com o que já foi referido anteriormente.

Tabela 2.2: Resistividade de diferentes tipos de rochas vulcânicas e de águas

Tipo de Rocha	Resistividades ($\Omega.m$)
Lava	$10^2 - 5 \times 10^4$
Gabbro	$10^3 - 10^6$
Basalto	$10 - 1.3 \times 10^7$
Tuff	2×10^3 (húmido) – 10^5 (seco)
Argila	1 – 100
Argila (húmida não consolidada)	20
Água das chuvas	$30 - 10^3$
Água de superfície (rochas ígneas)	$0.1 - 3 \times 10^3$
Água de superfície (sedimentos)	10 – 100
Água no subsolo	Média de 100
Água de nascente (rochas ígneas)	0.5 – 150; média 9
Água de nascente (sedimentos)	1 – 100; média 3
Água do mar	Média 0.2
Água com sal (3%) (m/m)	0.15
Água com sal (20%) (m/m)	0.02

Afonso *et al.* (1973) e (1974) in Custódio (1978), apresentam valores de resistividade eléctrica para rochas basálticas retiradas de publicações Havaianas e de experiências realizadas pelos autores nas ilhas Canárias em Lanzarote (tabela 2.3).

Tabela 2.3: Resistividade de rochas vulcânicas e materiais nelas contidas

Tipo de Rocha	Resistividades ($\Omega.m$)
Basalto recente e seco	40 000
Basalto recente saturado com água	300 – 700
Basalto próximo do seu ponto de fusão	100
Basalto saturado com água do mar	30 – 40
Basalto saturado com água do mar quente	10 – 20
Basalto fundido	2.5

Mouton (1974) *in* Custódio (1978), mediu resistividades no centro de Itália (Mar Tirreno), que estão supostamente relacionadas com água pouco mineralizada presente nas rochas (tabela 2.4).

Tabela 2.4: Resistividade de rochas vulcânicas e dos materiais que as constituem

Tipo de Rocha	Resistividades ($\Omega.m$)
Ignimbriticos traquiticos secos	500 – 5000
Ignimbriticos traquiticos saturados	200 – 600
Ignimbriticos saturados com água salgada	3 – 10
Lavas basálticas secas	500 – 3000
Lavas basálticas saturadas	70 – 500
Piroclastos finos	70 – 500
Bagacina Saturada	70 – 300
Bagacina saturada com água salgada	3 – 10
Fragmentos de piroclastos finos	70 – 500

Bardhan (1974) *in* Custódio (1978), apresenta resistividades de escoadas de basalto em Deccan, na Índia (tabela 2.5).

Tabela 2.5: Resistividade de rochas vulcânicas e materiais afins

Tipo de Rocha	Resistividades ($\Omega.m$)
Basalto saturado com cristais	50 – 225
Basalto fracturado saturado	30 – 90
Basalto meteorizado saturado	15 – 80
Solo seco argiloso derivado de basalto	6.5 – 7.5

Singhal (1974) *in* Custódio (1978), fez medições de resistividade em basaltos na Montanha Fuji (tabela 2.6).

Tabela 2.6: Resistividade de rochas vulcânicas

Tipo de rocha	Resistividades ($\Omega.m$)
Basalto não poroso	150 – 200, até 1000
Basalto vesicular	170 – 200
Basalto vesicular saturado	100 – 150
Basalto meteorizado	80 – 120
Basalto meteorizado saturado	20 – 50
Basalto muito meteorizado	15 – 30
Basalto muito meteorizado saturado	5 – 10

Yamamoto (1965) *in* Custódio (1978), mediu resistividades em basaltos na mesma zona a que se refere a tabela 2.6 (tabela 2.7).

Tabela 2.7: Resistividade de rochas vulcânicas e materiais nelas contidas

Tipo de rocha	Resistividades ($\Omega.m$)
Solo	10 000
Lahars recentes	30 – 800
Lahars antigos	500 – 3000
Escoadas de Lava	2000 – 50 000
Basalto velho denso	3000

2.4- Influência de parâmetros hidráulicos na resistividade eléctrica de rochas

A resistividade eléctrica de uma camada do subsolo depende de vários parâmetros hidráulicos, tais como, porosidade, mineralização da água, tamanho das partículas e indirectamente da condutividade hidráulica (Frohlich, 2000).

A utilidade da prospecção geoelectrica na pesquisa de água subterrânea, depende da quantidade de informação que se consegue obter, que seja relevante para os parâmetros referidos.

Baixas resistividades eléctricas de aquíferos podem representar indicadores positivos ou negativos para a sua exploração para consumo humano. Um valor baixo de resistividade devido a porosidades grandes representa um indicador positivo, contudo, se a resistividade eléctrica baixa for devido a elevadas concentrações de STD na água subterrânea representa um indicador negativo (Frohlich, 2000).

2.4.1- Corrente eléctrica através da água nas rochas e da porosidade

A matriz água/rocha tem uma grande influência na resistividade eléctrica de uma camada no subsolo e, se a camada está saturada com água, a condutividade eléctrica é em grande parte função da concentração de iões presentes na água (Frohlich, 2000).

A água presente no subsolo baixa a resistividade eléctrica das camadas proporcionalmente à sua condutividade, determinando que um aquífero apresente uma resistividade eléctrica muito inferior a uma camada não saturada do mesmo material rochoso. Aquíferos com resistividades demasiado baixas podem, dependendo do tipo de rocha, representar plumas de poluição com excesso de STD (Frohlich, 2000).

Archie (1950) apresentou a seguinte relação, para meios saturados, entre a resistividade eléctrica total de uma camada rochosa (ρ_b), a porosidade (Φ) e a resistividade eléctrica da água (ρ_w), em que se verifica que ρ_b diminui se ρ_w diminui e se Φ aumenta:

$$\rho_b = a \cdot \rho_w \cdot \Phi^{-m} \quad (2.6)$$

a e m são parâmetros específicos para cada tipo de rocha, que dependem da geometria dos poros e são usados para melhor expressar a resistividade eléctrica de uma rocha.

Na tabela 2.8 são apresentados valores que Zhdanov e Keller (1994) calcularam para os parâmetros a e m da equação de Archie (equação 2.6) que melhor se adaptam para os tipos de rochas apresentados, com ênfase para os materiais de origem vulcânica.

Na tabela 2.8 são igualmente apresentados valores de a e m calculados por Frohlich e Park (1989), obtidos em ensaios para o cálculo da porosidade em depósitos glaciares de material não consolidado de areia e gravilha, na Nova Inglaterra (Estados Unidos da América).

Tabela 2.8: Constantes da equação de Archie que podem ser usadas quando a litologia da rocha é conhecida. Adaptado de Zhdanov e Keller (1994)

Descrição da Rocha	a	m
Rochas pouco cimentadas, tais como areias e arenitos, com porosidades entre os 25 % e os 45%, normalmente do período terciário.	0.88	1.37
Rochas com cimentação moderada, incluindo arenitos, com porosidades entre os 18% e os 25%, normalmente do período Mesozóico.	0.62	1.72
Rochas muito bem cimentadas com porosidades entre os 20% e os 80%, normalmente do período paleozóico.	0.62	1.95
Rochas vulcânicas muito porosas, com porosidades entre os 20 % e os 80 %.	3.5	1.44
Rochas com porosidades inferiores a 4%, incluindo rochas ígneas densas e rochas sedimentares metamórficas.	1.4	1.58
Areia e gravilha de depósitos glaciares de Nova Inglaterra (Frohlich e Parke, 1989).	1	1.3
Maioria dos aquíferos de areia e gravilha. (Frohlich, 2000)	1	1.3

A importância da equação de Archie é demonstrada num caso de estudo, cujos resultados são apresentados na tabela 2.9, no qual para efeito de estudos de poluição da água por excesso de STD, se pretendeu perceber o que tinha maior influência na resistividade total das formações rochosas: se alterações na porosidade; ou alterações na resistividade eléctrica da água. A resistividade eléctrica da camada saturada foi estimada usando a equação 2.6 com $a=1$ e $m=1.3$, condutividades da água de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 770 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e porosidades de 27 %, 30 % e 46 %.

Tabela 2.9: Uso da equação de Archie para estimar a resistividade total (Frohlich, 2000)

σ_w ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ρ_w ($\Omega.\text{m}$)	Φ (%)	ρ_b ($\Omega.\text{m}$)
200	50	27	274
200	50	30	239
200	50	46	137
770	13	27	71
770	13	30	62
770	13	46	36

A análise dos resultados apresentados na tabela 2.9 permite concluir que a resistividade ou condutividade eléctrica da água tem um efeito muito superior na resistividade eléctrica total de uma formação, comparativamente ao efeito da porosidade. Considera-se que esta situação resulta do facto dos valores da resistividade total calculados para as duas condutividades eléctricas da água e diferentes valores de porosidade, têm uma variação pequena, quando comparados com a variação da resistividade total para os valores de porosidade com diferentes valores de condutividade da água.

Deste modo, valores de resistividades eléctricas totais de formações rochosas obtidas através de sondagens geoelectricas verticais, podem diagnosticar e distinguir aquíferos poluídos de aquíferos não poluídos, porque uma resistividade eléctrica total baixa, devido a uma resistividade eléctrica da água baixa, é normalmente devida a elevadas concentrações de STD (Frohlich, 2000).

2.4.2- Factor de Formação (F)

O Factor de Formação (F), estabelecido experimentalmente por Archie (1950), é um parâmetro fundamental que descreve a relação entre a resistividade eléctrica total de uma camada saturada (ρ_b) e a resistividade eléctrica da água (ρ_w):

$$F = \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad (2.7)$$

ou em termos de condutividade por:

$$F = \frac{\sigma_w}{\sigma_b} \quad (2.8)$$

Esta relação permite que, através do valor da resistividade eléctrica total de uma camada saturada detectada por uma sondagem eléctrica vertical, seja possível determinar qual a condutividade eléctrica da água e comparar com os valores aceitáveis para o consumo humano (Frohlich, 2000).

O valor do factor de formação é adimensional e varia de acordo o material rochoso e seus níveis de porosidade e compactação, podendo ser obtido com sondagens eléctricas verticais junto a furos de captação, onde a condutividade da água é obtida por análises à água do furo, a resistividade ou condutividade eléctrica total é obtida através da sondagem e o material rochoso pelo *log* do furo (Rocha, Ramalho e Afonso, 2003).

O factor de formação também pode ser relacionado com a porosidade através da seguinte equação definida igualmente por Archie (1950):

$$F = a. \Phi^{-m} \quad (2.9)$$

em que a e m são parâmetros específicos para cada tipo de rocha, de acordo com o anteriormente referido.

2.5- Prospecção geoelectrica

Uma corrente eléctrica quando é injectada no solo distribui-se em profundidade e, para uma distância constante entre dois eléctrodos de corrente, a sua intensidade diminui com a profundidade.

Através da prospecção geoelectrica, é medida a distribuição da corrente eléctrica injectada no solo, e obtidas as resistividades eléctricas do subsolo a diferentes profundidades.

Os valores obtidos, não são as resistividades eléctricas reais do solo, mas sim, uma resistividade eléctrica aparente. As resistividades eléctricas reais das diferentes camadas do subsolo são obtidas através da interpretação dos resultados com modelos.

2.5.1- Princípios gerais das medições geoelectricas

Nas medições geoelectricas transmite-se ao solo uma corrente eléctrica (I) através de dois eléctrodos de corrente (A e B), e mede-se a diferença de potencial (ΔV) resultante entre dois eléctrodos de tensão (M e N). Todos os eléctrodos têm um arranjo linear conforme o apresentado na Figura 2.5.

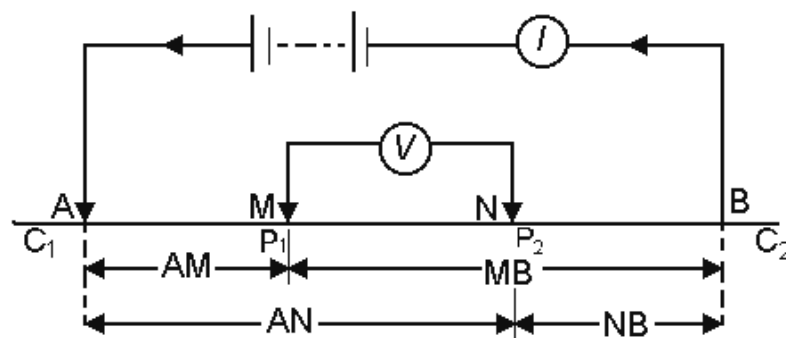


Figura 2.5: Arranjo linear AMNB com uma configuração de quatro eléctrodos

A unidade medida é a resistividade aparente que é calculada através da seguinte fórmula:

$$\rho_a = K \times \frac{\Delta V}{I} \quad (2.10)$$

sendo K um factor geométrico que depende da configuração e distância dos eléctrodos, I a intensidade da corrente transmitida ao terreno e ΔV a diferença de potencial resultante com as seguintes unidades: I [mA]; ΔV [mV], ρ_a [$\Omega \cdot m$].

A equação geral do factor geométrico (K) é:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \quad (2.11)$$

sendo AM, AN, BM, BN a distância entre os eléctrodos, expressa em metros. Esta equação pode ser aplicada para qualquer arranjo de eléctrodos, excepto para alguns casos específicos.

A resistividade aparente (ρ_a) resulta das características das diferentes camadas existentes, nomeadamente da litologia, espessura, profundidade e grau de saturação. As reais resistividades e espessuras das camadas do subsolo são obtidas através da interpretação das resistividades aparentes, medidas na superfície do terreno (Frohlich *et al.*, 1994).

2.5.2- Tipos de configuração dos eléctrodos

De acordo com as distâncias relativas entre os eléctrodos AM, AN, BM e BN, são possíveis diferentes configurações dos eléctrodos são possíveis. Contudo, apenas algumas são consideradas como padrão para sondagens eléctricas. A escolha da configuração dos eléctrodos depende do tipo de sondagem. Os tipos de sondagem são as Sondagens Eléctricas Verticais (SEV) e os Perfis Horizontais (Frohlich, 1996).

As sondagens eléctricas verticais são utilizadas quando o objectivo é medir mudanças de resistividade eléctrica em profundidade e detectar diferentes substratos horizontalmente estratificados, como é um caso de um aquífero para potencial exploração de água, uma vez que permite detectar o contraste de resistividade eléctrica entre camadas saturadas e não saturadas (Frohlich, 2000).

Os perfis horizontais são utilizados para detectar mudanças laterais de resistividade eléctrica a uma profundidade constante, que podem ser causadas por plumas de poluição ou por falhas tectónicas. Em alguns casos, uma combinação dos dois tipos de sondagens pode produzir melhores resultados (Frohlich, 2000).

Dois dos mais importantes e mais utilizados arranjos de eléctrodos, são o arranjo ou método Schlumberger e o método Wenner, em que para cada uma das duas configurações, são utilizados factores geométricos (K) únicos que simplificam a equação 2.11 (Frohlich, 1996).

2.5.2.1- Método Schlumberger

O método Schlumberger, nome atribuído em homenagem a um dos fundadores da geofísica, é o mais utilizado nas Sondagens Eléctricas Verticais, nomeadamente na detecção de água subterrânea. Esse método é preferencialmente usado se as camadas são mais ou menos horizontalmente estratificadas (Frohlich, 1996).

Nas sondagens a configuração dos eléctrodos é realizada de acordo com o apresentado na Figura 2.6, dispondo-se os eléctrodos de voltagem MN a uma curta distância um do outro, centrados entre os eléctrodos de corrente AB (Frohlich, 1996).

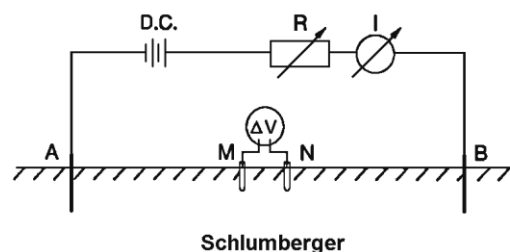


Figura 2.6: Configuração dos eléctrodos no método Schlumberger

As resistividades são medidas expandindo sucessivamente os eléctrodos de corrente AB, enquanto os eléctrodos de voltagem MN mantêm-se estacionários e a uma curta distância entre si (Frohlich *et al.*, 1994). A distância AB controla a profundidade de penetração, sendo que quanto maior a distância AB maior a penetração de corrente no subsolo.

Quando a voltagem medida se torna muito baixa em relação ao ruído eléctrico, porque a distância entre os eléctrodos A e B é grande, a distância MN deve ser expandida. Contudo, esta nunca poderá ter uma distância superior a 10 % da distância AB. (Frohlich, 1996).

Em regra, a profundidade de penetração da corrente eléctrica no subsolo varia entre 1/3 e 1/4 da distância AB (Frohlich, 1996).

Durante a medição as resistividades aparentes vão sendo sucessivamente inseridas num gráfico bilogarítmico em relação à distância $AB/2$, resultando deste modo uma curva de campo (curva SEV).

A curva SEV mostra as variações de resistividade em profundidade, onde para as mesmas condições litológicas os contrastes de resistividade entre as camadas saturadas e as não saturadas podem ser distinguidos (Frohlich *et al.*, 1994).

A resistividade aparente é calculada utilizando a equação 2.12, com o seguinte factor geométrico específico para o método Schlumberger:

$$K = \frac{\pi}{MN} \times \left[\left(\frac{AB}{2} \right)^2 - \left(\frac{MN}{2} \right)^2 \right] \quad (2.12)$$

2.5.2.2- Método Wenner

O método Wenner, corresponde a uma das mais antigas configurações actualmente utilizadas. Também é utilizado nas Sondagens Eléctricas Verticais, embora seja mais utilizado nos perfis horizontais (Frohlich, 2000).

No método Wenner (Figura 2.7), os eléctrodos são dispostos a uma distância constante e iguais entre si de modo a que, $AM = MN = BN = A$.

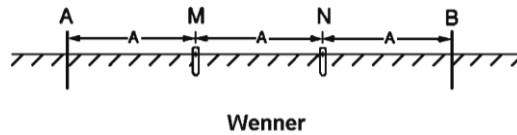


Figura 2.7: Configuração dos eléctrodos no método Wenner

O valor da distância A (Figura 2.7) e da distância AB (Figura 2.7), que controla a profundidade, deve ser escolhido com muito critério, usando como auxílio informação obtida através de uma sondagem eléctrica vertical. Todos os quatro eléctrodos são deslocados como uma única peça ao longo de uma linha horizontal, sendo o objectivo investigar uma possível anomalia que poderá ser uma pluma de poluição ou uma falha tectónica. Isto porque mudanças no valor da resistividade aparente, dentro de certos valores, podem ocorrer devido a uma falha ou pluma de poluição (Frohlich *et al.*, 1994).

A resistividade aparente é calculada utilizando a equação 2.13 com o seguinte factor geométrico específico para o método Wenner:

$$K = 2\pi A \quad (2.13)$$

2.5.3- Equipamento de prospecção geoelectrica

Existem dois parâmetros que é preciso ter em conta quando se pretende adquirir equipamento para prospecção geoelectrica, a profundidade que se pretende atingir e o nível de precisão. Isto porque, de acordo com a importância desses dois parâmetros, o preço do equipamento pode variar muito.

O equipamento é constituído por uma fonte de corrente eléctrica, um amperímetro, um voltímetro, cabos para a condução da corrente eléctrica e de eléctrodos de corrente e de voltagem. Existem aparelhos que já fazem a função de indução de corrente eléctrica, e com a medição da diferença de potencial e consequente medição da resistividade eléctrica.

- **Fonte de corrente eléctrica:**

De modo a se poder induzir uma quantidade considerável de corrente eléctrica ao solo, é necessário que a mesma seja superior à resistência dos eléctrodos de corrente. É também necessário que a diferença de potencial entre os eléctrodos de voltagem seja suficiente para ser diferenciada de ruído eléctrico, principalmente perto de zonas industriais, quando se atinge profundidades grandes (espaçamentos $AB > 500$ m) e quando se fazem medições em substratos de baixa resistividade eléctrica (Frohlich, 1996).

Deste modo, valores baixos de voltagem disponíveis por baterias de 12 V DC são insuficientes. É necessário uma fonte de corrente eléctrica com um “output” entre 200 e 800 V DC, para garantir uma corrente com uma intensidade de 0.1 A. Para conseguir profundidades maiores poderá ser necessário atingir o 1000 V DC (Frohlich, 1996).

- **Amperímetro:**

Para medir a corrente eléctrica deverá ser utilizado um amperímetro que tenha uma amplitude de leitura grande, entre pequenos valores, da ordem de mA até 0.5 A (Frohlich, 2000).

- **Voltímetro:**

Na medição da diferença de potencial, a voltagem deve ser medida para as mais pequenas variações na corrente eléctrica, deste modo, deverá ser utilizado um voltímetro com uma impedância acima dos 500 000 Ω . O voltímetro deve, à semelhança do amperímetro, ter uma grande amplitude de leitura (Frohlich, 1996).

- **Eléctrodos de corrente:**

Os eléctrodos de corrente mais utilizados são estacas de alumínio, cobre ou ferro com cerca de meio metro de comprimento. Os eléctrodos são inseridos no solo e ligados até ao aparelho de medição por cabos.

Na presença de solos muito secos, especialmente no verão, a resistência de contacto com o solo aumenta bastante, podendo nalguns casos ser muito difícil transmitir uma quantidade mínima de corrente. Nestes casos deve-se molhar com água o solo que envolve os eléctrodos, de modo a baixar a resistência de contacto (Frohlich, 2000).

- **Eléctrodos de voltagem:**

Os eléctrodos de voltagem podem ser de alumínio, cobre ou ferro, de acordo com o atrás referido, mas de modo a evitar problemas indesejados de estabilização de voltagem, causados pela polarização dos eléctrodos devido à electrólise do solo, devem ser escolhidos eléctrodos não polarizados (Frohlich, 2000).

Um exemplo de um eléctrodo não polarizado, é o eléctrodo não polarizado de cobre em solução de sulfato de cobre apresentado na Figura 2.8. O eléctrodo de cobre é mergulhado numa solução de sulfato de cobre que está contida num tudo de plástico, cerâmica ou porcelana. A parte de baixo desse tudo é permeável e promove o contacto entre a solução de sulfato de cobre e a electrólise do solo, diminuindo deste modo a difusão da diferença de potencial (Zhdanov e Keller, 1994).

Este modelo típico de um eléctrodo não polarizado pode ser de outro tipo de metal com a sua respectiva solução.

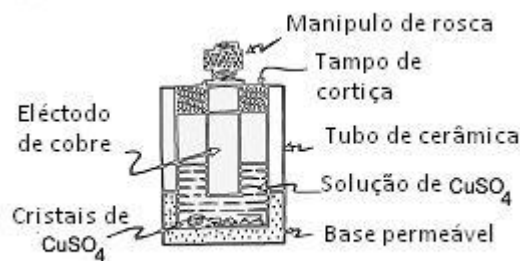


Figura 2.8: Esquema de um eléctrodo não polarizado (Zhdanov e Keller, 1994)

- **Cabos eléctricos:**

Os cabos utilizados para ligar os eléctrodos aos diversos componentes descritos anteriormente são típicos cabos eléctricos de cobre.

Na organização dos quatro conjuntos de cabos (dois de corrente e dois de voltagem) deve-se, de modo a evitar ruído eléctrico nos cabos que ligam aos eléctrodos de voltagem, provocados pela corrente que passa nos cabos que ligam aos eléctrodos de corrente, mantê-los afastados entre si alguns centímetros.

Apresenta-se na figura 2.9, uma configuração de eléctrodos com o método Schlumberger (secção 2.5.2.1), com os equipamentos descritos para uma campanha de prospecção geoelectrica.



Figura 2.9: Disposição dos equipamentos necessários para uma medição geoelectrica com o método Schlumberger

Existem aparelhos que fazem a função de indução de corrente eléctrica, medição da diferença de potencial e consequente medição da resistividade eléctrica, com um simples carregar de um botão. Mas como esses aparelhos têm um custo mais elevado, um arranjo com os componentes descritos anteriormente são mais utilizados e com resultados igualmente bons.

2.5.4- Fontes de ruído eléctrico

Existem algumas fontes de ruído eléctrico que podem interferir nas leituras da corrente eléctrica e especialmente na voltagem, que podem causar pequenos erros nas medições das resistividades eléctricas aparentes. As principais fontes de ruído são em seguida referenciadas.

- ***Polarização dos eléctrodos de voltagem:***

Este tipo de fonte de ruído é causado pelo contacto entre a electrólise do solo e o metal dos eléctrodos de voltagem. Esse contacto pode causar alguma instabilização na diferença de potencial medida (Frohlich, 2000).

O uso de eléctrodos não polarizados, conforme descrito na secção 2.5.3, reduz, ou pode mesmo anular esse efeito.

- ***Corrente Telúrica:***

As correntes telúricas são correntes eléctricas que se fazem sentir naturalmente no subsolo da Terra. Esse tipo de ruído pode ter alguma interferência na medição da corrente eléctrica induzida, principalmente na presença de um grande espaçamento entre os eléctrodos de corrente necessários para se atingir maiores profundidades (Frohlich, 2000).

- ***Proximidade a condutores de electricidade:***

Medições efectuadas na vizinhança de linhas de média e alta tensão e de linhas de telefone, podem produzir interferências na medição da resistividade eléctrica (Frohlich, 2000).

- ***Presença de falhas tectónicas:***

A presença de uma ou mais falhas tectónicas pode alterar as condições de horizontalidade natural na estratificação. Esta situação pode provocar, numa sondagem eléctrica vertical, variações abruptas nas resistividades eléctricas aparentes, que podem tornar impossível a interpretação das medições por não se conseguir individualizar as camadas existentes no subsolo.

2.5.5- Interpretação de Sondagens Eléctricas Verticais com modelos

O objectivo da interpretação é converter uma curva SEV (ρ_a vs. $AB/2$), obtida através de uma sondagem eléctrica vertical, numa sequência horizontal de camadas em função das suas resistividades, espessuras e profundidades (Frohlich e Urish, 2002).

Uma curva de campo só pode ser interpretada se o subsolo apresentar uma estratificação horizontal ou sub-horizontal, e se a curva tiver uma boa extensão vertical e horizontal. Constitui também uma condição importante a curva não apresentar mudanças abruptas de resistividade aparente, e não ter declives superiores a 45° (Frohlich *et al.*, 1994).

No caso de se verificarem resistividades laterais associadas a discontinuidades verticais, como de falhas, filões ou solos muito heterogéneos, as condições acima referidas podem não se verificar, sendo a interpretação mais complexa (Frohlich *et al.*, 1994).

O primeiro passo na interpretação de curvas de campo é a criação de um modelo de camadas horizontais. O modelo é especificado pelo número de camadas que pode ser identificado na curva de campo (Frohlich, 1996).

A grande maioria das sondagens eléctricas verticais apresentam curvas de campo com três a cinco camadas, onde as curvas de campo com quatro ou mais camadas são uma combinação de quatro tipos principais de curvas de campo de três camadas, que são apresentadas na Figura 2.10. Essas curvas são identificadas como curvas do tipo H, K, A e Q (Frohlich, 1996).

As curvas do tipo H e Q são, respectivamente, curvas típicas para aquíferos suspensos e aquíferos de base. Na curva do tipo H, a segunda camada tem uma curvatura descendente devida à baixa resistividade do aquífero e a terceira camada tem uma curvatura ascendente devido à elevada resistividade da camada não saturada imediatamente abaixo do aquífero. Por outro lado, na curva do tipo Q, a segunda camada também apresenta uma curvatura descendente devido à baixa resistividade do aquífero de água doce. Contudo, a terceira camada apresenta uma curvatura ainda mais descendente devido à muito baixa resistividade do aquífero de água salgada. Nalguns casos, a zona de transição entre a água doce e a salgada pode aparecer na curva de campo (Frohlich *et al.*, 1994).

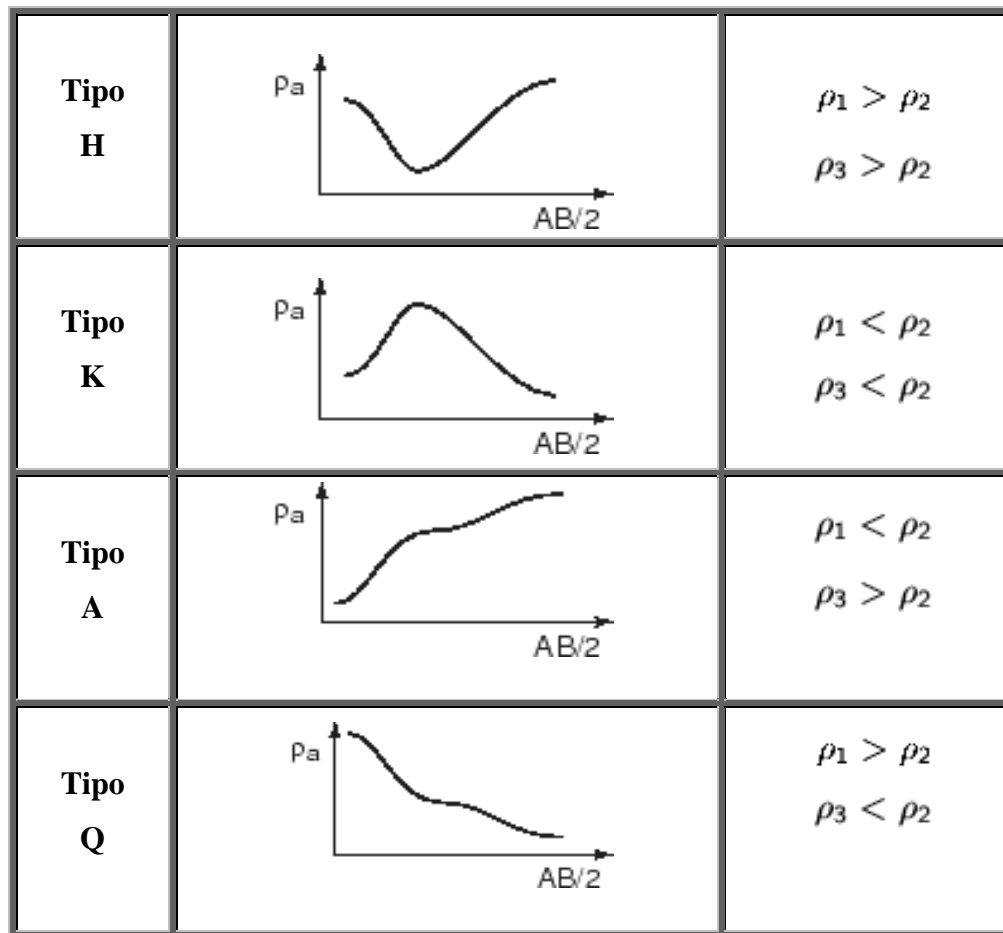


Figura 2.10: Quatro modelos tipos de curvas de 3 camadas

A curva do tipo K, pelas mesmas razões descritas no parágrafo anterior, pode representar na sua terceira camada um aquífero, isto se o contraste entre as resistividades eléctricas das segundas e terceiras camadas for significativa. Se não for o caso, poderá ser uma camada não saturada com maior porosidade, ou de um tipo de material com menor resistividade eléctrica. Por sua vez, a curva do tipo A não apresenta nenhuma camada saturada, por apenas apresentar curvas ascendentes devidos a grandes valores de resistividade eléctrica.

Quando o modelo é criado com o seu número de camadas, suas resistividades e espessuras; uma curva modelo é gerada. A curva modelo é comparada com a de campo, onde se vai alterar as resistividades e espessuras das camadas do modelo até as duas curvas coincidirem, isto porque, a forma da curva modelo depende das resistividades e espessuras do modelo adoptado.

Quando as duas curvas atingem o máximo de coincidência possível, o modelo adoptado é uma possível representação das verdadeiras resistividades e espessuras das camadas no subsolo.

O complexo processo de inversão de uma curva SEV, e de ajuste das duas curvas é conseguido através de software baseado num algoritmo desenvolvido por Ghosh (1971).

O modelo adoptado apresenta valores, que são considerados reais, de resistividades e espessuras de cada camada do subsolo, excepto na última camada do modelo, em que a

resistividade é calculada e a espessura é considerada como infinita ou sem valor. Em cada modelo, os valores altos de resistividade das camadas não saturadas podem ser distinguidos dos valores baixo das camadas saturadas.

Para uma correcta interpretação dos dados das sondagens eléctricas verticais, é importante ter informação sobre a geologia dos terrenos onde as medições são feitas e, se possível, dispor de informação complementar de furos em zonas geológicas semelhantes com sondagens eléctricas verticais realizadas.

Esta informação complementar pode ajudar, porque uma sondagem eléctrica vertical realizada ao lado de um furo numa zona com características geológicas semelhantes à da área de estudo, pode afinar um possível modelo, verificando se a profundidade da camada saturada obtida pelo modelo é semelhante à profundidade real, apresentada pelo “log” do furo e, com isso, estabelecer valores de resistividade para o tipo de material apresentado pelo “log” do furo (Frohlich, 1996).

Um exemplo de uma curva de campo e de uma curva modelo coincidentes é apresentado na Figura 2.11, onde a curva a tracejado é a curva modelo mais coincidente e os pontos representam a curva de campo. O número de camadas do modelo, suas resistividades e espessuras, são apresentados nas caixas no fundo do gráfico.

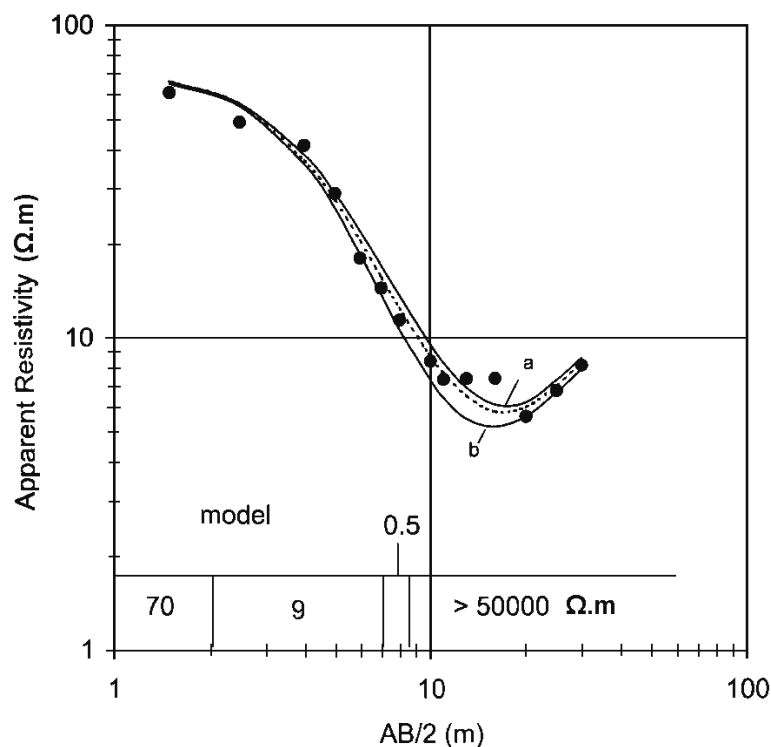


Figura 2.11: Sondagem eléctrica vertical numa zona costeira industrial. Círculos: Dados de campo (curva de campo). Curvas modelo: a – modelo com limite inferior; b – modelo com limite superior; tracejado – curva modelo mais coincidente (Frohlich e Urish, 2002)

2.5.5.1- Problema de não – singularidade

Apesar da grande capacidade da modelação, nem sempre é possível encontrar um modelo perfeito que produza uma curva modelo coincidente com a curva de campo. Muitas vezes, diferentes modelos podem produzir a mesma curva modelo, e deste modo modelos com diferentes espessuras e resistividades podem representar a mesma curva de campo. Nestes casos, tem-se o problema de não – singularidade, por haver mais do que um modelo que representa a curva de campo (Frohlich, 2000).

Este é um problema que deve ser tido em consideração na interpretação das curvas de campo, mas não é muito grave, desde que os diferentes modelos que podem representar a curva de campo não apresentem grandes discrepâncias. Poderá haver diferenças de espessuras na ordem dos dois a cinco metros, por exemplo, mas diferenças na ordem dos 10 ou 20 metros já não são aceitáveis (Frohlich *et al.*, 1994).

Nos casos de estudo em que o objectivo é detectar uma camada saturada, deve ser apresentado o modelo com os valores de resistividade e espessura intermédios da camada saturada, sendo esse o modelo considerado mais correcto. Também poderão ser apresentados os modelos com os limites inferiores e superiores, principalmente se a discrepância for significativa, de acordo com o atrás referido. Para ajudar a reduzir a incerteza causada pela não – singularidade, informação adicional de furos adjacentes à área de estudo ou informação de medições efectuadas em solos com a mesma tipologia poderá ser usada (Frohlich *et al.*, 1994).

2.5.5.2- Efeito de resistividade lateral

Sondagens eléctricas verticais são interpretadas assumindo um modelo com camadas horizontalmente estratificadas. Qualquer falha tectónica perto da zona da medição pode provocar efeitos indesejados de resistividade lateral. Uma falha é causada por heterogeneidades laterais que podem ser visíveis à superfície e estenderem-se até profundidades desconhecidas (Frohlich *et al.*, 1996).

As resistividades laterais, normalmente determinam que os valores das resistividades eléctricas aparentes medidas sejam muito dispersos, provocando uma curva de campo muito instável com mudanças abruptas na resistividade aparente. Curvas deste tipo são muito difíceis de serem reproduzidas por modelo com camadas horizontalmente estratificadas. Por vezes, pode acontecer que as curvas de campo sejam estáveis, mas os modelos produzidos apresentam camadas com resistividades e profundidades que não fazem sentido (Frohlich, Fisher e Summerly, 1996).

Para reduzir o efeito da resistividade lateral em sondagens eléctricas verticais deve-se manter uma distância razoável entre a medição e a falha. Deve-se, no mínimo, manter o centro da medição afastado, dentro de um círculo com um raio equivalente à distância máxima utilizada nos eléctrodos de corrente a dividir por três ($AB/3$) (Frohlich *et al.*, 1996).

2.5.5.3- Deslocação da curva de campo

Como referido na secção 2.5.2.1, numa sondagem eléctrica vertical os eléctrodos de corrente A e B são expandidos e os de voltagem M e N são deixados fixos. A dada altura, normalmente quando se atinge separações grande entre A e B, a diferença de potencial obtida cai para valores muito baixos, que não conseguem ser medidos pelo voltímetro. Nestes casos a separação entre os eléctrodos M e N é expandida conforme a Figura 2.12, mas sempre mantendo a condição em que $MN < 10\%$ de AB .

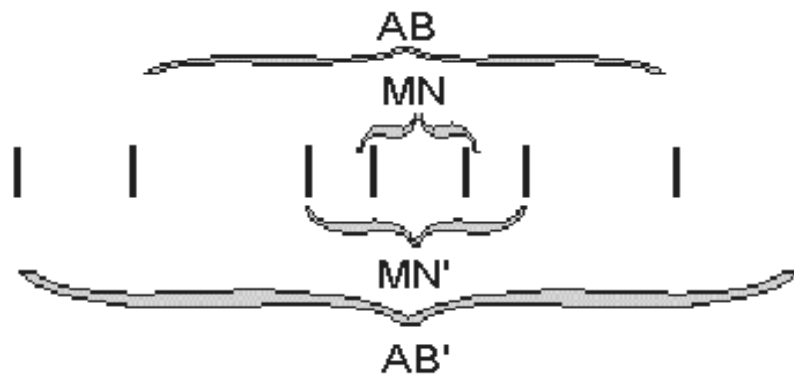


Figura 2.12: Resistividade medida para espaçamentos AB e AB' com as distancias MN e MN'

Nestes casos é aconselhável repetir as medições da resistividade para a mesma distância AB duas ou três vezes, considerando quer a nova, quer a antiga separação dos eléctrodos M e N. Depois, ao inserir no gráfico bilogarítmico as resistividades eléctricas aparentes em relação à distância $AB/2$, pode acontecer que os pontos da curva de campo medidos para o mesmo $AB/2$ e diferentes $MN/2$ estejam deslocados entre si (Figura 2.13). Nestes casos, escolhe-se os valores de resistividade aparente que melhor reproduzem a curva de campo (Frohlich, 2000).

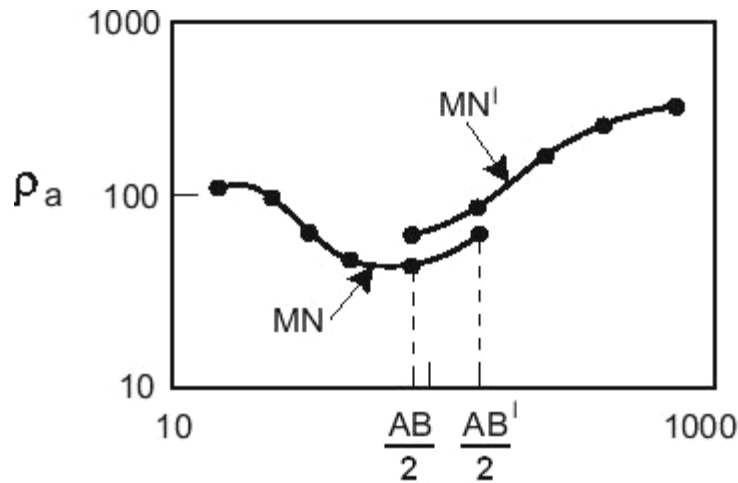


Figura 2.13: Curva SEV com o efeito de deslocação

2.5.6- Sondagem eléctrica vertical paralela a uma linha costeira

Quando é efectuada uma sondagem eléctrica vertical paralela a uma linha de costa, em que o objectivo é camada saturada de água doce do aquífero de base e a sua qualidade, a água salgada do mar pode ter um efeito lateral indesejável nas resistividades aparentes medidas e nas resistividades das camadas obtidas pelos modelos de interpretação, isto é, os seus valores serão mais baixos do que realmente são, devido ao efeito da água salgada. Este efeito aumenta quanto maior é o espaçamento entre os eléctrodos A e B (Frohlich e Urish, 2002).

Nestes casos é feita uma correcção do efeito da água salgada nas resistividades aparentes, assumindo uma barreira vertical semi-infinita que representa a limitação entre a zona terrestre e a água do mar (Frohlich e Urish, 2002).

As resistividades aparentes são corrigidas através do método de imagens, isto se o arranjo de eléctrodos é paralelo à costa, de acordo com a representação apresentada na Figura 2.14 (Frohlich e Urish, 2002).

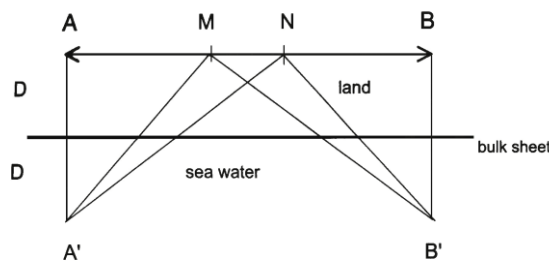


Figura 2.14: Método de imagem aplicado a uma sondagem eléctrica vertical paralela a uma zona costeira (Frohlich e Urish, 2002)

Os eléctrodos de corrente A e B são espelhados a uma distância D da barreira. Os pontos A' e B' da imagem também vão contribuir para a diferença de potencial entre os eléctrodos M e N, dependendo nas mudanças de resistividade ao longo da barreira, nas distâncias A'M, A'N, B'M e B'N, e nas distâncias AB (Frohlich e Urish, 2002).

Deste modo, de acordo com a teoria do método de imagens proposto por Van Nostrand e Cook (1966), as resistividades eléctricas aparentes são corrigidas de acordo com a seguinte equação:

$$\frac{\rho^*}{\rho_1} = 1 + \frac{1}{MN} \left[\left(\frac{AB}{2} \right)^2 - \left(\frac{MN}{2} \right)^2 \right] \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)} \times \left\{ \left[\left(\frac{AB}{2} - \frac{MN}{2} \right)^2 + 4D^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[\left(\frac{AB}{2} + \frac{MN}{2} \right)^2 + 4D^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (2.14)$$

em que ρ_1 é a resistividade eléctrica aparente que seria medida se não existisse o efeito da água do mar; ρ_2 é a resistividade da água do mar; ρ^* é a resistividade aparente perto da barreira formada pelo mar; e D é a distância entre a sondagem eléctrica vertical e a barreira formada pelo mar.

A equação 2.14 é controlada pelo quociente $(\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$. Como a resistividade da água do mar é perto de zero, podemos dizer que $(\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1) = -1$. Isto faz com que o segundo termo da equação seja negativo e que o primeiro termo (ρ^* / ρ_1) seja menor que 1. Deste modo, a resistividade aparente medida (ρ_a) com o arranjo de eléctrodos AMNB a cada distância AB/2 é multiplicada pelo inverso da equação 2.14, que é $(\rho^* / \rho_1)^{-1}$, para obter a resistividade aparente corrigida (ρ_{corr}) de acordo com a equação seguinte:

$$\rho_{corr} = \rho_a \left(\frac{\rho^*}{\rho_1} \right)^{-1} \quad (2.15)$$

Com a equação 2.15, as resistividades aparentes com o efeito da resistividade lateral da água do mar, principalmente para as medidas com espaçamentos de AB/2 grandes, são calculadas para valores similares ao que teriam se não existisse o efeito lateral da água salgada (Frohlich e Urish, 2002).

2.6- Importância de informação adicional na interpretação das sondagens eléctricas verticais

De modo a obterem-se imagens mais fiáveis do substrato em estudo e interpretações mais significativas dos resultados de campanhas de prospecção geoelectrica, é necessária a utilização de dados auxiliares ou complementares. Estes são e podem ser obtidos através de:

- Dados de “logs” de furos de captação e dos seus ensaios de caudal;
 - Análises químicas da água;
 - Caracterização geológica extraída dos “logs”;
- Medições em laboratório de amostras representativas de furos, amostras de solos e de afloramentos geológicos;
- Caracterização hidrogeológica da zona de estudo através de trabalhos feitos naquela área ou em áreas similares;
- Dados de outros métodos geofísicos.

Essa informação é importante, principalmente os dados de furos, e podem ajudar a clarificar alguns dos resultados ambíguos da prospecção geoelectrica, nomeadamente:

1. Se numa camada saturada a resistividade eléctrica muito baixa é devida a temperaturas elevadas da água, à porosidade elevada ou à concentração elevada de sólidos totais dissolvidos;
2. Para a correcta determinação de um factor de formação (F) de modo a obter-se a melhor relação da matriz solo mais água;
3. Mais correcta interpretação de curvas de campo, especialmente para reduzir o problema de não singularidade.

2.7- Aplicações do método geoelectrico

Os métodos geoelectricos têm vindo a ser utilizados num vasto número de aplicações e o número de problemas que têm vindo a ser resolvidos por este método é muito vasto (Zhdanov e Keller, 1994).

Com o desenvolvimento da tecnologia, o método geoelectrico ganhou novas capacidades, especialmente com rápidos softwares de modelação, onde passou a ser possível fazer prospecções geoelectricas a duas e a três dimensões. Contudo, a grande vantagem deste método é que pode ser

aplicado a problemas que não são passíveis de grande investimento, uma vez que se trata de um método de baixo custo quando comparado com outros (Zhdanov e Keller, 1994).

O método geoelectrico é preferencialmente utilizado nos estudos de detecção de água subterrânea porque a resistividade eléctrica dos materiais rochosos é muito influenciada pela presença de água. Outros tipos de estudo são a pesquisa de fontes geotermiais e a identificação de aquíferos contaminados (Frohlich, 2000).

- ***Estudos de pesquisa de água subterrânea***

As sondagens eléctricas verticais são o método mais utilizado e eficaz na pesquisa de água subterrânea na maioria dos estratos geológicos, utilizando preferencialmente o arranjo de eléctrodos Schlumberger (Frohlich, 2000).

A prospecção geoelectrica, devido à sua inerente capacidade de detectar mudanças na resistividade eléctrica da água, é uma ferramenta muito eficaz para a exploração de água subterrânea em zonas costeiras, por ser muito provável detectar a interface entre a água doce e a água salgada presentes nos aquíferos de base nas zonas costeiras e em ilhas (Frohlich e Urish, 1990).

Por vezes, as campanhas de prospecção geoelectrica através das sondagens eléctricas verticais podem não revelar informações essenciais sobre um aquífero mas, no mínimo, delimitam áreas que não são propícias para a execução de furos de captação e, com isso, poupa-se muito dinheiro (Frohlich, 2000).

- ***Estudos ambientais***

Existem varias aplicações do método geoelectrico na área do ambiente, tais como:

1. **Detecção de plumas de poluição causadas por aterros sanitários e outras fontes de poluição (contaminação de água subterrânea)**

Porque a água subterrânea é o principal condutor de poluição através do subsolo, e esta poluição pode ser detectada pela resistividade eléctrica, as campanhas de prospecção geoelectrica podem ter um papel importante em estudos de contaminação de aquíferos.

O método geoelectrico tem vindo a ser muito utilizado na localização de poluição em águas subterrâneas, através do mapeamento de zonas com resistividades eléctricas muito baixas, porque um aquífero poluído pode estar associado a um aumento de concentração de STD e consequente diminuição da resistividade eléctrica (Frohlich, 2000).

Uma pluma de poluição também pode estar associada a uma resistividade eléctrica elevada, se a causa da poluição for devido à presença de hidrocarbonetos que, tipicamente, apresentam resistividades mais elevadas que a água (Benson *et al.*, 1997).

2. Exploração de recursos geotérmicos

O método geoelectrico é um dos preferencialmente utilizados na pesquisa de recursos geotérmicos, devido ao efeito da temperatura na resistividade eléctrica. Temperaturas elevadas diminuem a resistividade eléctrica da água e consequentemente a resistividade eléctrica da camada saturada. Contudo, em ilhas vulcânicas é normalmente difícil distinguir se uma camada com uma resistividade eléctrica muito baixa é devido a águas termais ou a águas muito mineralizadas, devido à intrusão salina em aquíferos de base (Frohlich, 2000).

Apesar da aplicação destinada à pesquisa ou estudos de recursos de água subterrânea serem as mais conhecidas, existem outras áreas em que os métodos geoelectricos podem ter um papel de apoio muito importante. Essas aplicações são:

- ***Inspeção de terrenos para obras de engenharia (estudos geotécnicos)***

Sondagens eléctricas verticais podem ser utilizadas como apoio à inspeção de solos para diferentes tipos de obras de engenharia, tais como, teste de fundações para a construção de auto estradas, caminhos-de-ferro, viadutos, canais, reservatórios, edifícios, etc. As principais informações que podem ser obtidas a partir das sondagens são a profundidade à rocha mãe, as espessuras e tipo de materiais geológicos das diferentes camadas existentes e a presença de falhas (Zhdanov e Keller, 1994).

- ***Exploração de petróleo***

Neste caso específico, métodos geoelectricos são apenas utilizados como uma ferramenta auxiliar, devido ao efeito que os hidrocarbonetos têm ao elevar a resistividade eléctrica de uma camada (Benson *et al.*, 1997).

- ***Arqueologia***

Em estudos de arqueologia os métodos geoelectricos são utilizados para detectar fundações de estruturas já há muito tempo desaparecidas (Zhdanov e Keller, 1994).

3- Caso de Estudo I: *Prospecção Geoeléctrica para a detecção de massas de água subterrânea na zona das Fajãs Praia da Vitória*

3.1- Introdução

No presente capítulo, é apresentado o caso de estudo I que consiste numa campanha de prospecção geoeléctrica, realizada a pedido da empresa municipal Praia Ambiente, entidade gestora de distribuição de água do concelho da Praia da Vitória, com o objectivo de indicar a melhor localização para a realização de um furo de captação de água para consumo humano.

Efectuaram-se trabalhos de prospecção geoeléctrica, na zona da Fajã, freguesia da Aqualva, e nas zonas envolventes ao clube de Golfe da Ilha Terceira, na freguesia de S. Brás, com objectivo de identificar e caracterizar eventuais massas de água subterrânea captáveis para consumo humano.

Procuraram-se identificar eventuais aquíferos suspensos, uma vez que as características hidrogeológicas da zona são propícias à existência deste tipo de estruturas hidrogeológicas.

Os trabalhos de campo iniciaram-se em 18 de Janeiro de 2009 e prolongaram-se até 21 de Abril do mesmo ano, uma vez que as condições atmosféricas nos referidos meses nem sempre foram propícias a trabalhos no terreno.

A análise dos resultados processou-se entre Abril e Maio de 2009.

3.2- Caracterização da zona de estudo

3.2.1- Enquadramento geomorfológico

A zona das Fajãs e envolvente das instalações do Clube de Golfe da Ilha Terceira, localiza-se na zona de transição entre a Caldeira dos Cinco Picos, uma depressão vulcanotectónica que trunca o sector central do maciço do mesmo nome, e a metade Este do maciço de Guilherme Moniz, nomeadamente das estruturas domáticas que constituem o Centro Vulcânico do Pico Alto.

Do ponto de vista topográfico, esta área apresenta-se globalmente aplanada, apresentando, nas zonas atravessadas por escoadas lávicas com morfologia do tipo *aa*, um microrelevo acentuado.

A presença de estruturas subterrâneas do tipo tubos de lava é comum nas escoadas que formam os estratos mais superficiais do substrato rochoso desta zona.

Na área em estudo os solos são muito diversos, sendo incipientes ou litólicos nos campos lávicos recentes ou desenvolvidos nas zonas mais antigas.

Grande parte da zona de estudo foi alterada por actividade antrópica recente associada à actividade agrícola, exploração de pedreiras e construção do campo de golfe da Ilha Terceira.

A Nordeste da zona de estudo são captadas duas nascentes, dispostas num afloramento lávico, para abastecimento do Clube de Golfe da Ilha Terceira e rega das instalações desportivas.

3.2.2- Enquadramento geológico e tectónico

A zona de estudo localiza-se ao longo de alinhamento vulcano-tectónico de expressão regional, de tendência direccionada 145° NNW-SSE, genericamente denominado “rift” da Terceira. Esta estrutura engloba na parte subaérea da ilha o estratovulcão dos Cinco Picos, a caldeira do mesmo nome e a caldeira Guilherme Moniz.

Foi identificada uma falha com expressão significativa na zona em estudo, que coincide com parte do traçado da ribeira da Areia.

Localização da Zona de Estudo

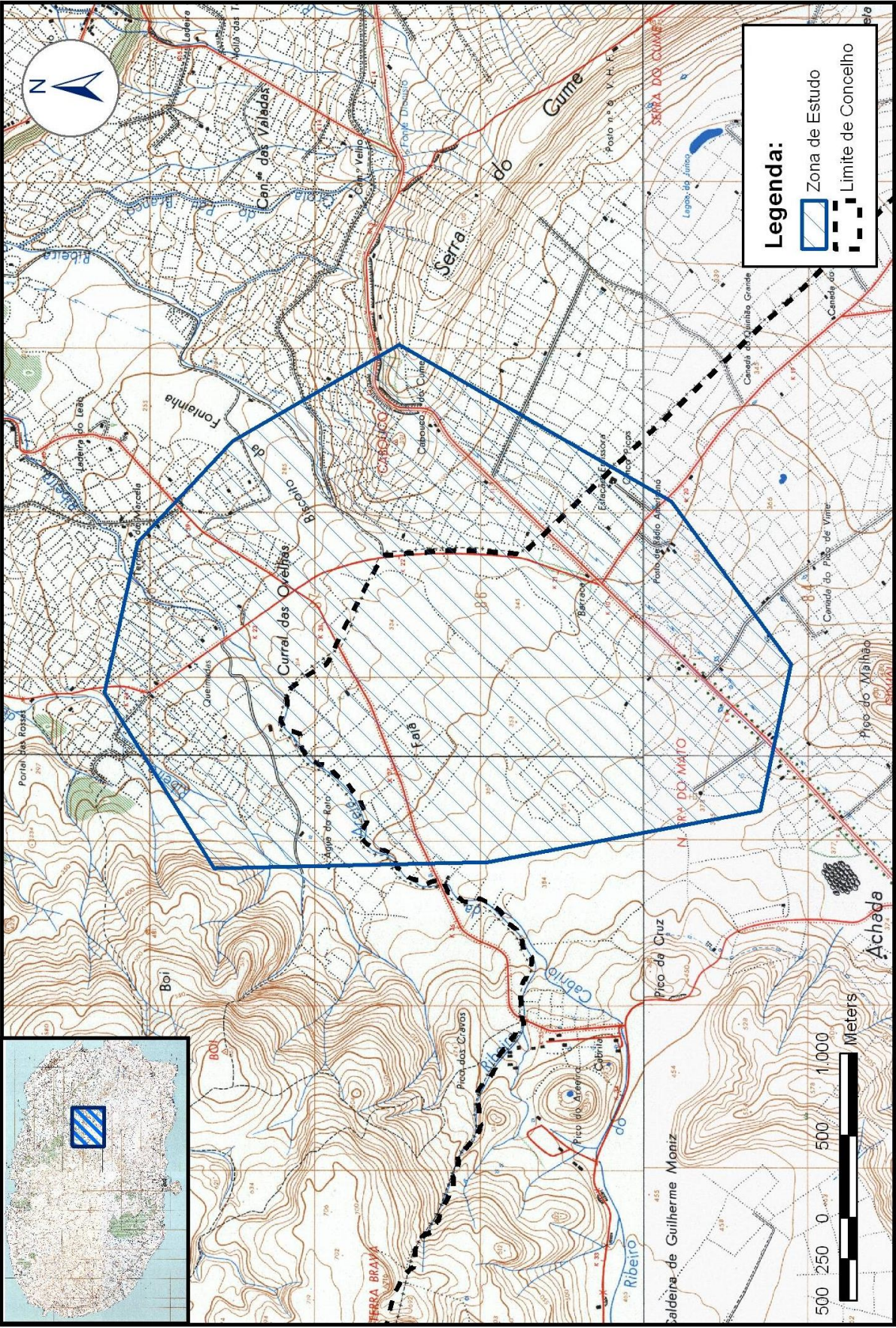


Figura 3.1: Localização da zona de estudo

De acordo com a carta geológica da ilha Terceira, Rodrigues (2002), o substrato geológico da zona interceptada por este trabalho é constituído pelas seguintes formações (Figura 3.2):

- (1) formação traquibasáltica dos Cinco Picos;
- (2) formação basáltica inferior
- (3) formação basáltica superior

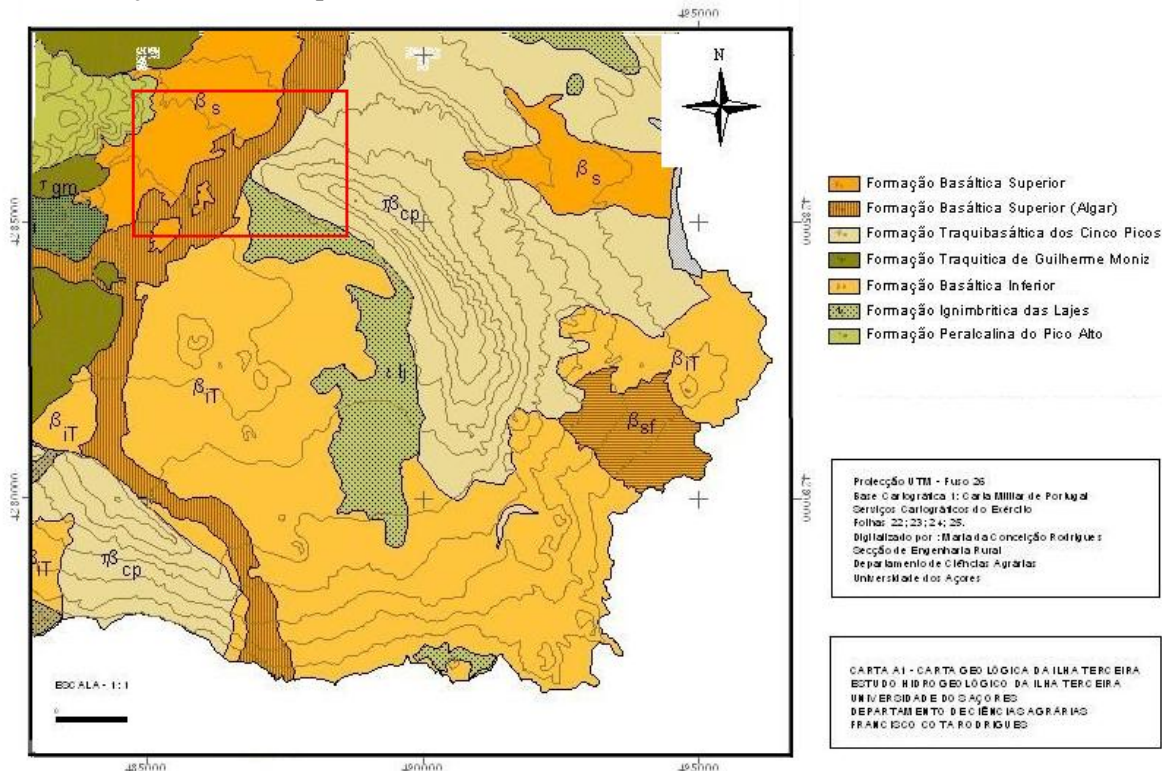


Figura 3.2: Carta geológica da zona de estudo

A formação traquibasáltica dos Cinco Picos, a mais antiga da ilha, forma o substrato litológico de todo o estratovulcão dos Cinco Picos. É formada por escoadas lávicas intermédias, que surgem normalmente alternadas por níveis piroclásticos pouco desenvolvidos. Não são conhecidos afloramentos desta formação na zona de estudo, inferindo-se contudo a sua presença nos níveis mais profundos a partir da geologia circundante.

Os basaltos inferiores da ilha Terceira são constituídos por escoadas lávicas e depósitos piroclásticos de natureza basáltica, extruídos a partir de centros emissores dispostos no interior da caldeira dos Cinco Picos há mais de 20 000 anos. Nas zonas onde afloram apresentam normalmente solos desenvolvidos e bem estratificados.

A formação basáltica superior, explorada nas pedreiras circundantes, ocupa o nível estratigráfico superior de parte da zona de estudo. É constituída por uma escoada lávica de natureza basáltica, extruída há aproximadamente 2 000 anos a partir de centros emissores localizados nas proximidades do Algar do Carvão. Nas zonas onde afloram estes materiais o microrelevo é irregular, do tipo *aa* e existem litossolos.

3.3- Prospeção Geoelectrica

3.3.1- Trabalhos de Campo

Realizaram-se oito sondagens eléctricas verticais (SEV) utilizando o método Schlumberger (PA1 a PA 7) na zona do Campo de Golfe da Ilha Terceira, localizada no extremo Norte da caldeira dos Cinco Picos. Os trabalhos realizaram-se entre os dias 18 de Janeiro e 21 de Março de 2009.

O Objectivo dessa campanha de prospeção geoelectrica foi a detecção de massas de água subterrânea para potencial exploração para consumo humano.

3.3.1.1- Equipamento

O equipamento utilizado para induzir corrente eléctrica no solo e medir as resistividades aparentes foi um Terra Meter SAS 1000 da companhia ABEM. O SAS 1000 tem uma capacidade de transmitir uma corrente eléctrica ate 1000 mA de intensidade.

Os eléctrodos de corrente e de voltagem são de cobre. Para transmitir a corrente foram utilizadas duas roldanas contendo ambas 1000 m de cabo eléctrico.

3.3.1.2- Localização

As sondagens foram efectuadas na zona de transição entre o extremo norte da Caldeira dos Cinco Picos e a caldeira de Guilherme Moniz, na zona envolvente ao clube de Golfe da ilha Terceira, conforme o apresentado na Figura 3.3.

As coordenadas UTM e altitude de cada uma das sondagens são apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Coordenadas UTM e altitude das sondagens eléctricas verticais

Sondagem	Latitude (m)	Longitude (m)	Cota (m)
PA 1	4 286 609	485 628	339
PA 2	4 287 842	486 182	292
PA 3	4 285 792	486 853	341
PA 4	4 287 372	486 780	296
PA 5	4 286 330	485 550	343
PA 5A	4 286 330	485 550	343
PA 6	4 285 592	485 448	365
PA 7	4 284 644	485 421	380

As sondagens foram efectuadas numa zona com solos desenvolvidos e com um substrato geológico formado por Basaltos Inferiores.

Localização das Sondagens Eléctricas Verticais

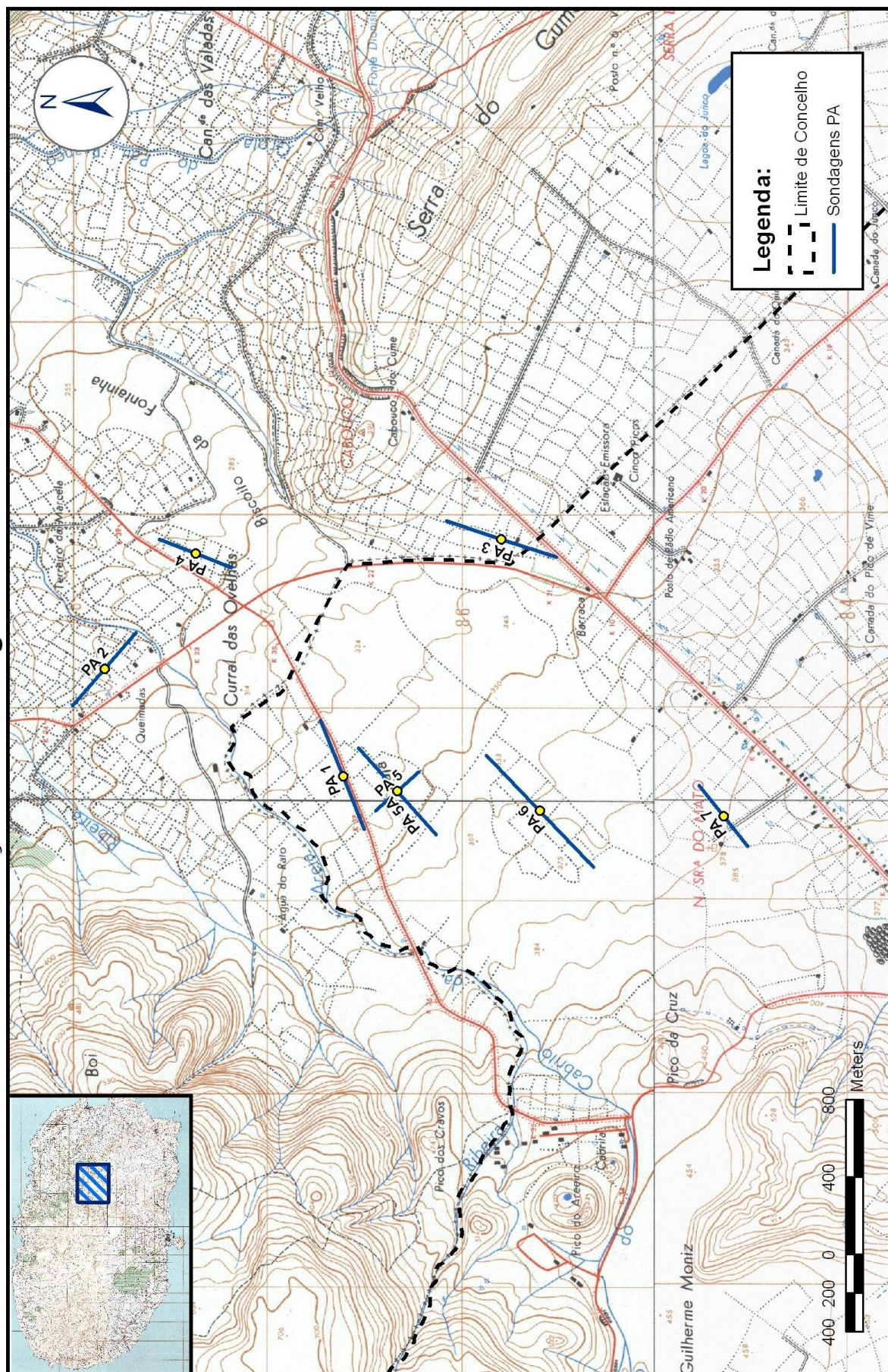


Figura 3.3: Localização das sondagens eléctricas verticais

3.3.1.3- Procedimentos

Todas as medições foram efectuadas com o método Schlumberger, conforme descrito na secção 2.6.2.1.

O espaçamento AB/2 máximo atingido pelos eléctrodos de corrente em cada medição variou entre os 150 m e os 400 m, de acordo com a limitação de espaço disponível no terreno.

A distância MN/2 dos eléctrodos de voltagem foi de 0.5 m para espaçamentos curtos de AB/2, e foi aumentado de acordo com o espaçamento máximo de cada medição para 1.5 m ou 2.5 m.

Durante as medições no terreno as resistividades aparentes foram inseridas num gráfico de papel bilogarítmico, de modo a que qualquer erro durante as medições fosse passível de ser detectado e corrigido.

3.3.1.4- Condicionantes

A natureza litológica de certas áreas do terreno e a vegetação condicionaram a localização das sondagens e o espaçamento entre os eléctrodos A e B, tendo sido evitadas.

3.3.1.5- Interpretação das sondagens eléctricas verticais

As curvas de campo foram interpretadas utilizando-se o software de modelação “GEOMATE” da Universidade de Rhode Island, conforme descrito na secção 2.6.5.

As curvas modelo, as curvas de campo (ρ_a vs. AB/2) e os modelos gerados para cada sondagem são apresentados nas Figuras 3.4 a 3.11.

O modelo é representado no fundo de cada gráfico paralelamente ao eixo das distâncias AB/2, onde a espessura e profundidade de cada camada estão na mesma escala do eixo AB/2. As camadas saturadas de cada modelo estão representadas com riscas diagonais em azul.

Todas as medições indicam a presença de camadas saturadas, associadas a contrastes pronunciados de resistividade nas camadas mais profundas e a descidas nas curvas de campo.

Os valores gerados pelos modelos para os basaltos não saturados variam entre os 3000 $\Omega.m$ e os 8500 $\Omega.m$ de resistividade, dependendo da fracturação. Estes dados são concordantes com os obtidos por Teixeira *et al* (2006), Frohlich e Berbereia (2000) e Anderson *et. al* (1981) em medições efectuadas em escoadas lávicas da ilha Terceira.

A resistividade nos basaltos saturados variou entre os 280 $\Omega.m$ e 550 $\Omega.m$, dependendo dos sólidos totais dissolvidos (STD) na água (Zhdanov e Keller, 1994), também em concordância com os dados obtidos pelos referidos autores.

Os valores baixos de resistividade verificados nas camadas superficiais do terreno reflectem o tipo de solo e diferentes graus de humidade.

- Sondagem PA 1:

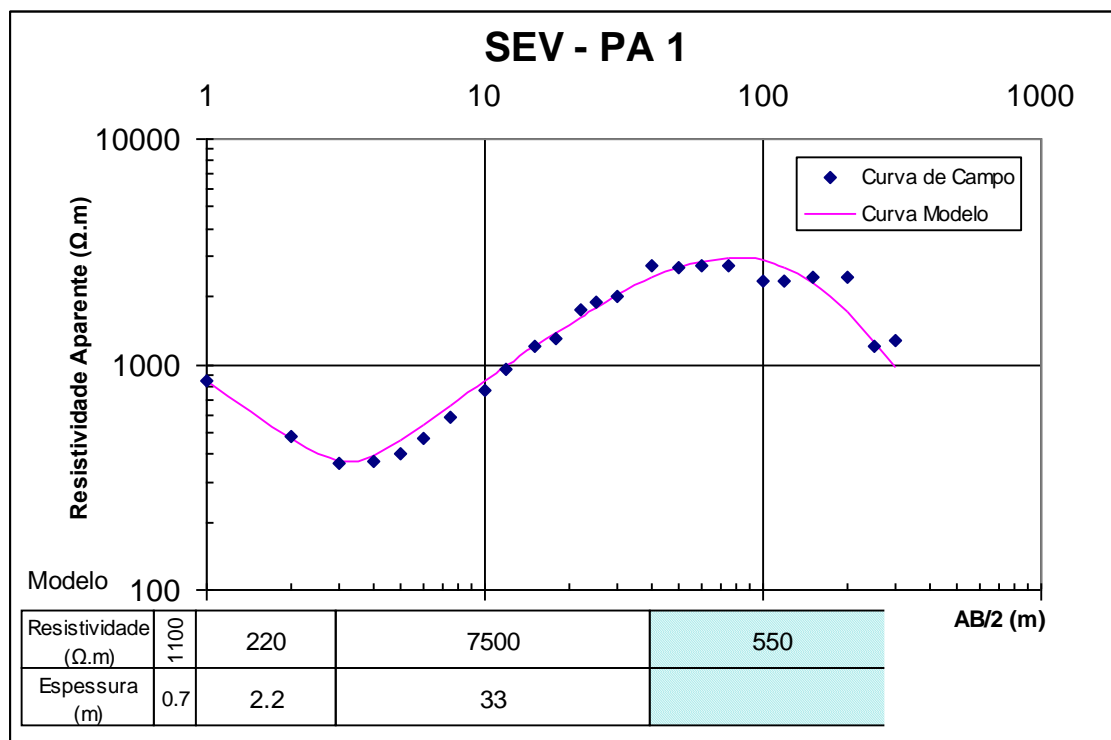


Figura 3.4: Sondagem eléctrica vertical PA 1, com a curva modelo mais coincidente e o respectivo modelo

A sondagem PA 1 foi realizada a uma altitude de 339 m com uma separação máxima de AB/2 de 300 m.

A curva de campo apresentada na Figura 3.4 caracteriza-se por uma descida da resistividade aparente até aos três m de AB/2, subindo depois até aos 50 m de AB/2. A partir deste valor estabiliza até aos 75 m de AB/2, a partir do qual desce até aos 300 m de AB/2.

O valor de 7500 $\Omega.m$ de resistividade verificado na terceira camada do modelo, parece indicar um substrato de basalto compacto no terreno. O surgimento de valores de resistividade de 550 $\Omega.m$ na terceira camada indica, muito provavelmente, uma camada de basalto saturada.

Deste modo PA1 apresenta um modelo de quatro camadas, uma das quais saturada com uma resistividade de 550 $\Omega.m$, localizada a uma profundidade de 40 m e com um nível piezométrico de 299 m.

- Sondagem PA 2:

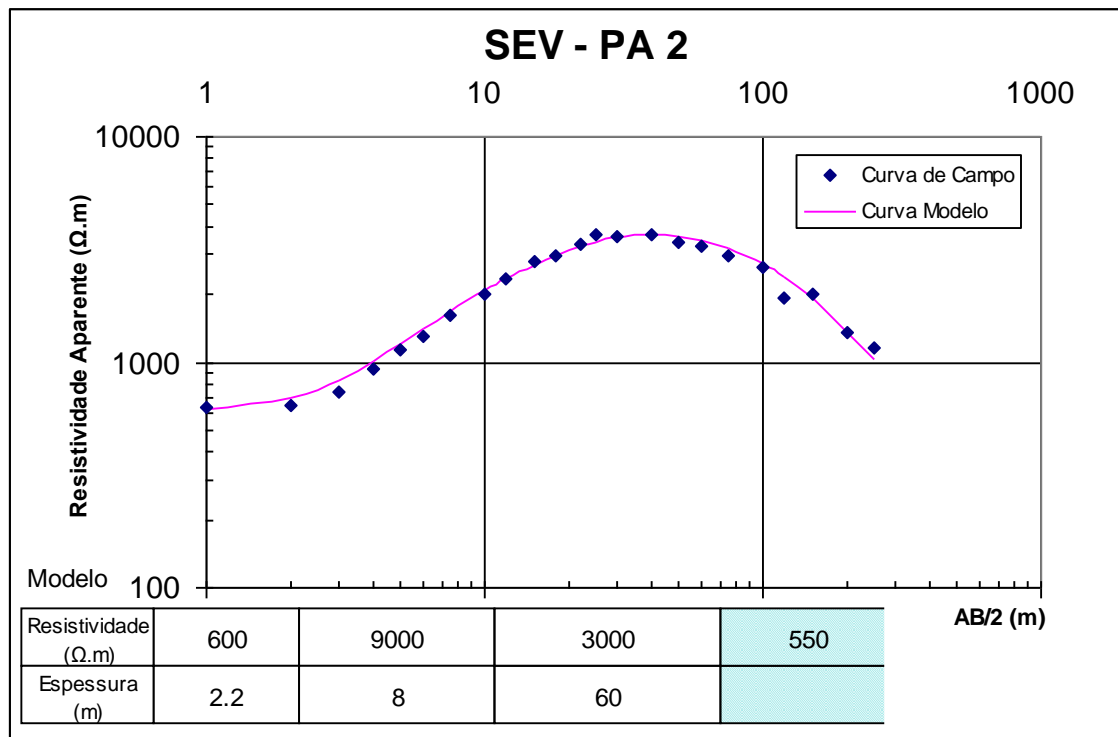


Figura 3.5: Sondagem eléctrica vertical PA 2, com a curva modelo mais coincidente e o respectivo modelo

A sondagem PA 2 foi realizada a uma altitude de 292 m com uma separação máxima de AB/2 de 250 m.

A curva de campo apresentada na Figura 3.5 caracteriza-se por uma subida da resistividade aparente até aos 40 m de AB/2, descendo ligeiramente até aos 100 m, para voltar a descer com um maior gradiente até aos 250 m de AB/2.

O valor de 9000 Ω.m de resistividade verificado na segunda camada do modelo indica um substrato de basalto muito compacto, sendo que o valor de 3000 Ω.m da terceira camada indicia que o basalto se encontra mais fragmentado e poroso.

A resistividade de 550 Ω.m na quarta camada indica, muito provavelmente, uma camada de basalto saturada.

Assim PA 2 apresenta um modelo de quatro camadas, uma das quais saturada com uma resistividade 550 Ω.m, localizada a uma profundidade de 70 m e com um nível piezométrico de 222 m.

- Sondagem PA 3:

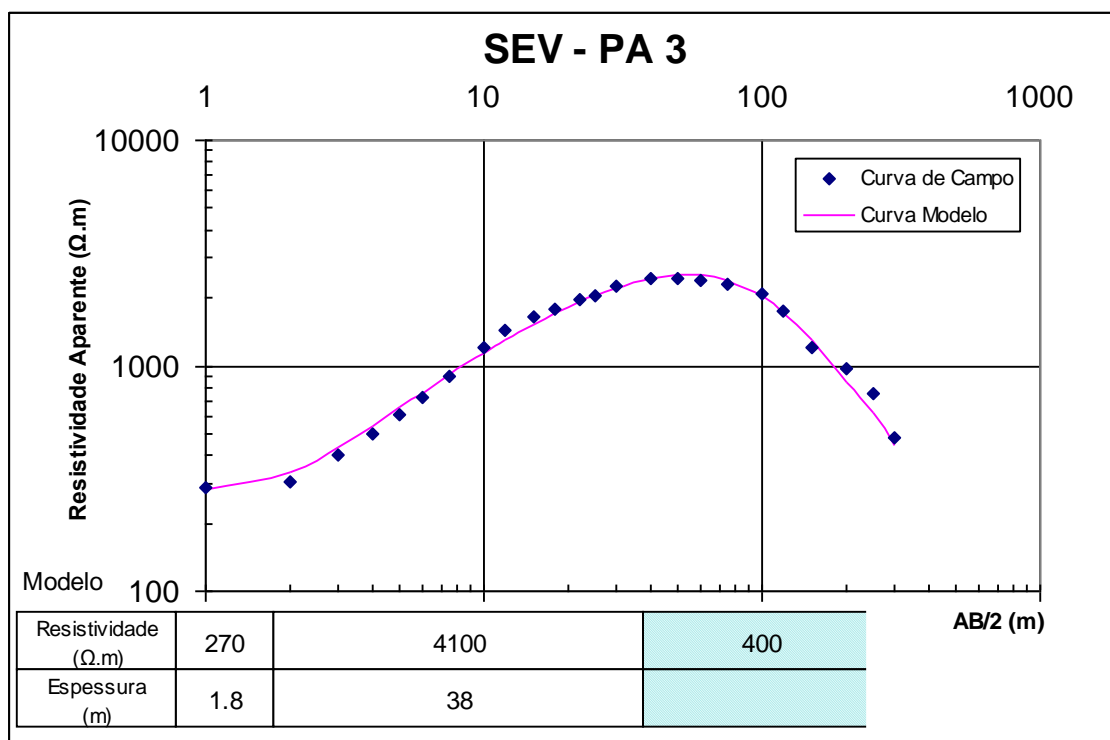


Figura 3.6: Sondagem eléctrica vertical PA 3, com a curva modelo mais coincidente e o respectivo modelo

A sondagem PA 3 foi realizada a uma altitude de 341 m com uma separação máxima de AB/2 de 300 m.

A curva de campo apresentada na Figura 3.6 caracteriza-se por uma subida da resistividade aparente até aos 40 m de AB/2, começado a descer muito ligeiramente até aos 75 m e descendo depois até aos 300 m de AB/2.

A SEV PA 3 apresenta um modelo de três camadas, uma das quais saturada com uma resistividade de 400 Ω.m, localizada a uma profundidade de 40 m e com um nível piezométrico de 301 m.

- Sondagem PA 4:

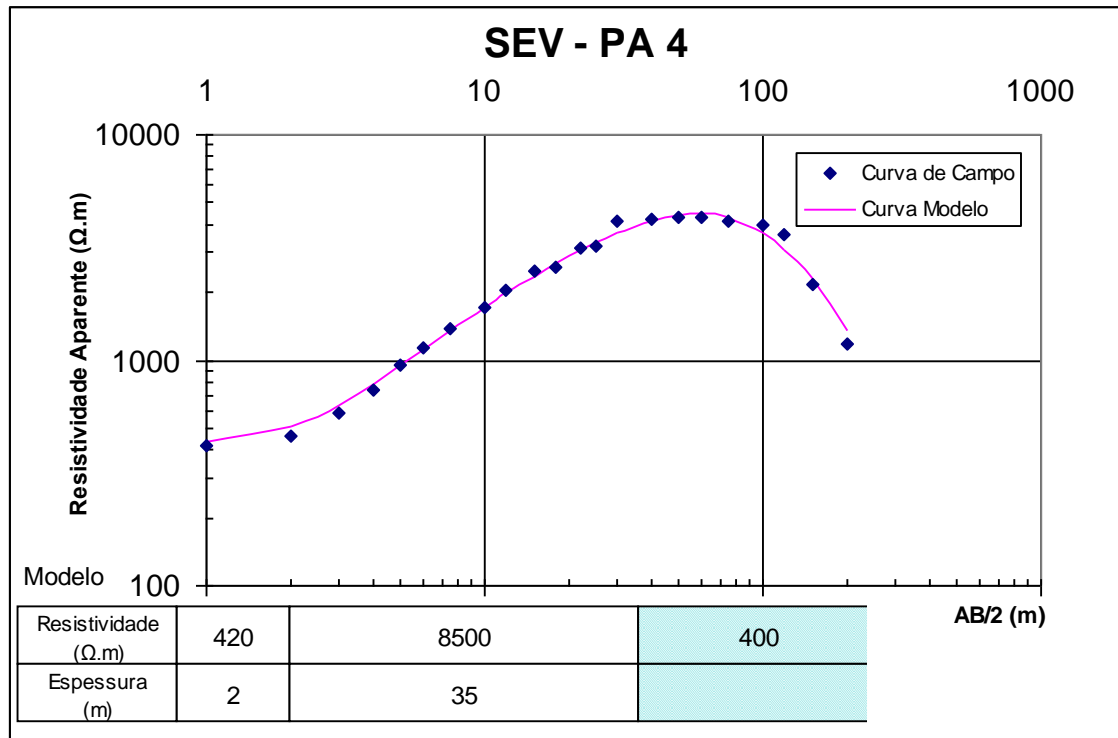


Figura 3.7: Sondagem eléctrica vertical PA 4, com a curva modelo mais coincidente e o respectivo modelo

A sondagem PA 4 foi realizada a uma altitude de 296 m com uma separação máxima de AB/2 de 200 m.

A curva de campo apresentada na Figura 3.7 caracteriza-se por uma subida da resistividade aparente até aos 40 m de AB/2, estabilizando até aos 75 m e descendo depois até aos 200 m de AB/2.

A SEV PA 4 apresenta um modelo de três camadas, uma das quais saturada com uma resistividade de 400 Ω.m, localizada a uma profundidade de 37 m e com um nível piezométrico de 259 m.

- Sondagens PA 5 e PA 5A:

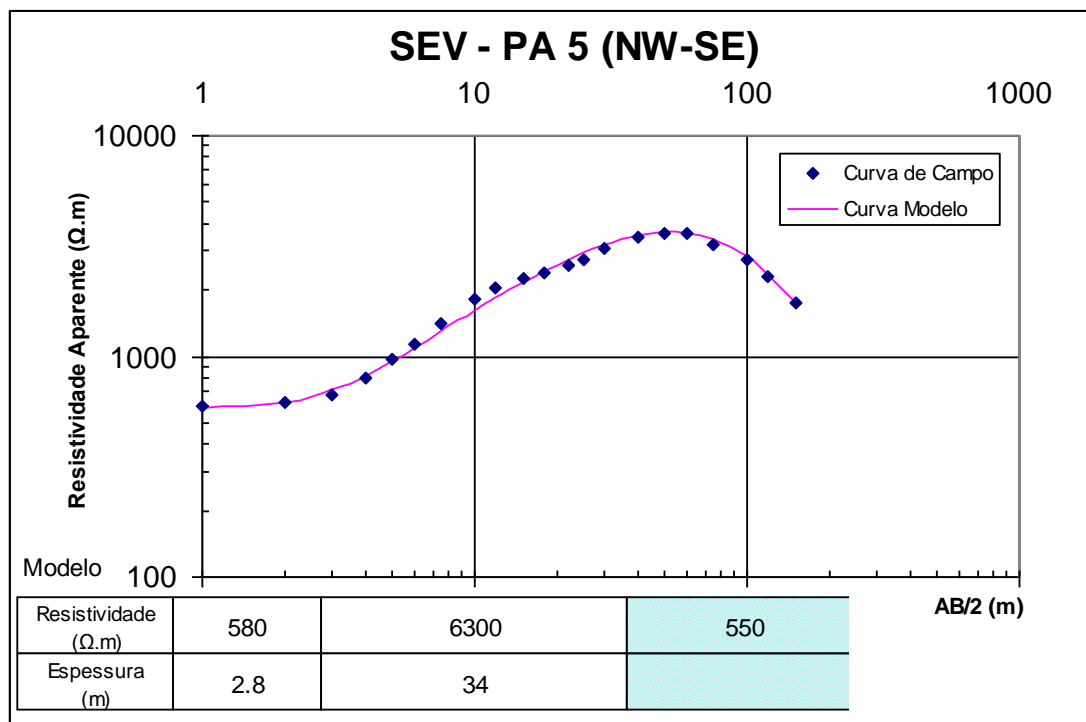


Figura 3.8: Sondagem eléctrica vertical PA 5, com a curva modelo mais coincidente e o respectivo modelo

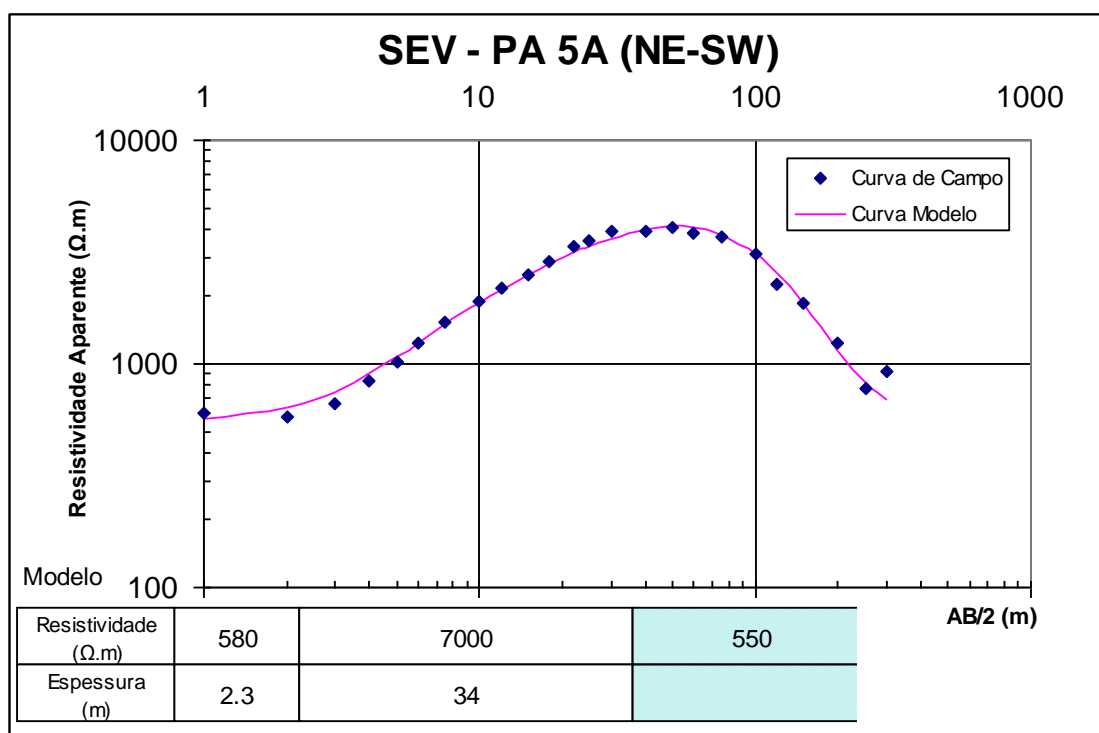


Figura 3.9: Sondagem eléctrica vertical PA 5A, com a curva modelo mais coincidente e o respectivo modelo

Uma vez que os centros das sondagens PA 5 e PA 5A foram no mesmo ponto de modo a realizar-se uma medição em cruz, as duas curvas foram interpretadas em conjunto.

A PA 5 foi realizada no sentido NW-SE e a PA 5A no sentido NE-SW. Ambas foram realizadas a uma altitude de 343 m com uma separação máxima de AB/2 de 150 m para PA 5 e de 300 m para PA 5A.

As duas curvas de campo (Figuras 3.8 e 3.9) caracterizam-se por uma subida da resistividade aparente até aos 60 m de AB/2 para PA 5 e 50 m para PA 5A, a partir do qual descem até aos 150 m de AB/2 para PA 5 e 300 m para PA 5A.

As duas sondagens apresentam um mesmo modelo de três camadas, uma das quais saturada com uma resistividade de 550 $\Omega.m$, localizada a uma profundidade de 36.5 m e com um nível piezométrico de 306.5 m.

- Sondagem PA 6:

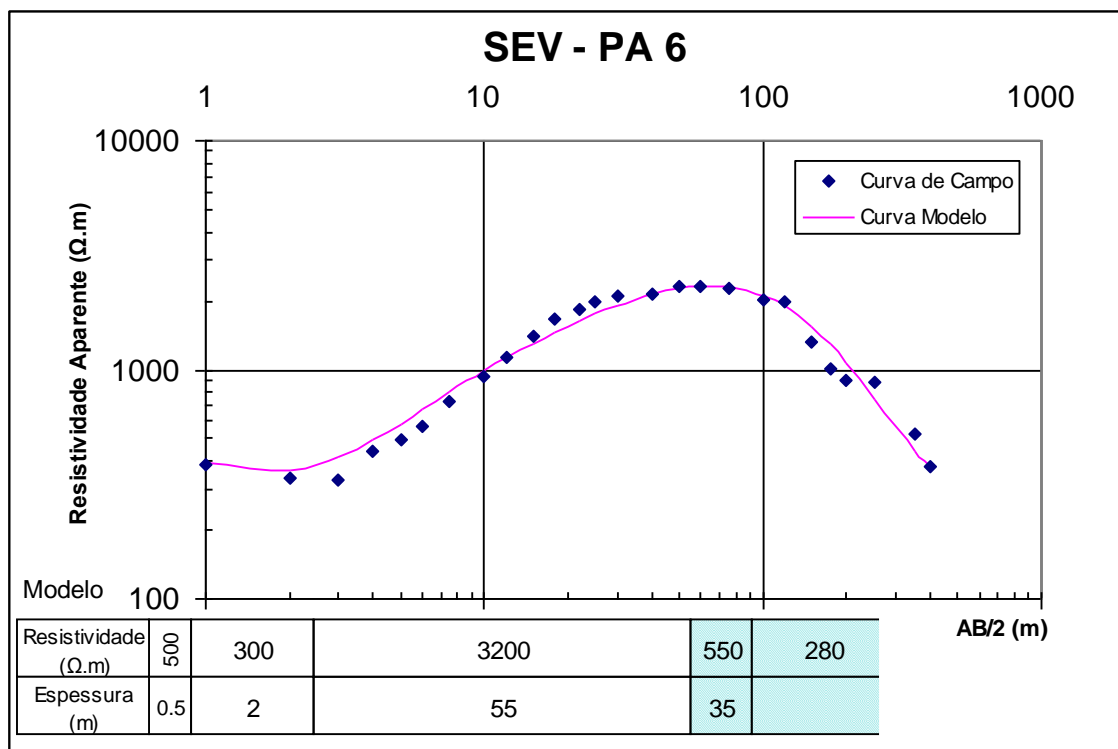


Figura 3.10: Sondagem eléctrica vertical PA 6, com a curva modelo mais coincidente e o respectivo modelo

A sondagem PA 6 foi realizada a uma altitude de 365 m com uma separação máxima de AB/2 de 400 m.

A curva de campo apresentada na Figura 3.10 caracteriza-se por uma ligeira descida da resistividade aparente até aos 3 m de AB/2, subindo depois até aos 30 m de AB/2. A partir deste valor estabiliza até aos 75 m de AB/2, a partir do qual desce continuamente até aos 400 m de AB/2.

A SEV PA 6 apresenta um modelo de cinco camadas duas das quais saturadas. Uma superior com 550 $\Omega.m$ de resistividade, localizada a uma profundidade de 57.5 m, com um nível piezométrico de 307.5 m e uma espessura de 35 m. Uma inferior com 280 $\Omega.m$ de resistividade, localizada a uma profundidade 92.5 m e com um nível piezométrico de 272.5 m.

- Sondagem PA 7:

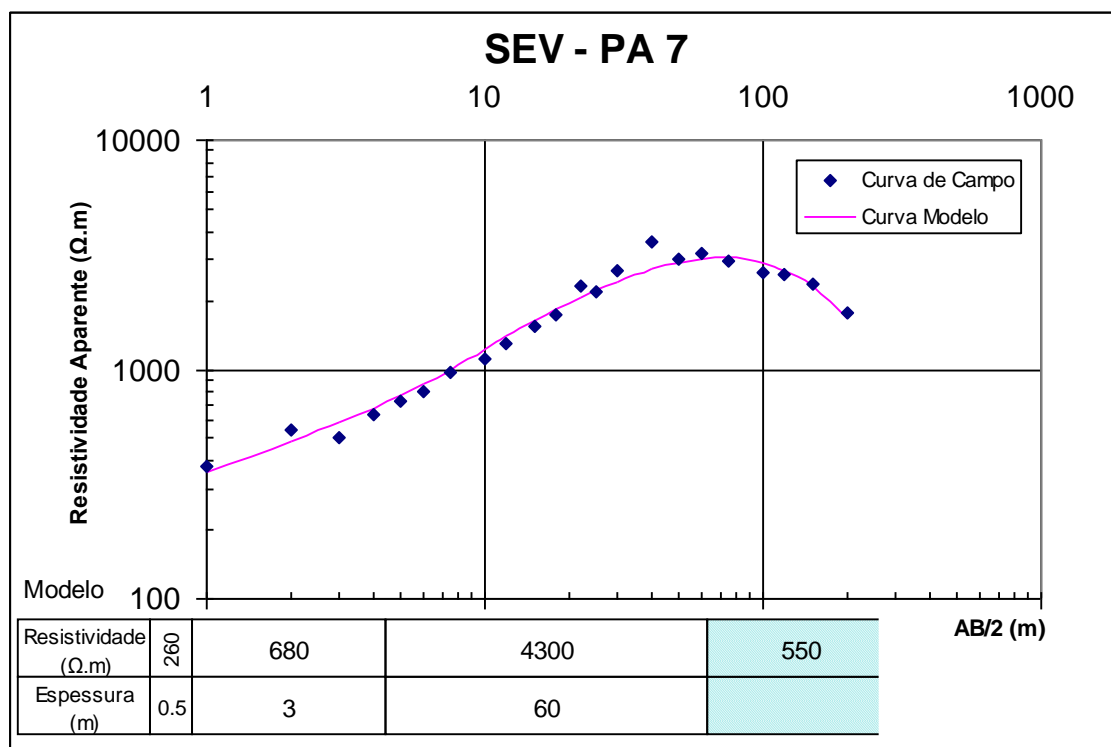


Figura 3.11: Sondagem eléctrica vertical PA 7, com a curva modelo mais coincidente e o respectivo modelo

A sondagem PA 7 foi realizada a uma altitude de 376 m com uma separação máxima de AB/2 de 200 m.

A curva de campo apresentada na Figura 3.11 caracteriza-se por uma subida da resistividade aparente até aos 60 m de AB/2, descendo depois até aos 200 m de AB/2.

A SEV PA 7 apresenta um modelo de quatro camadas, uma das quais saturada com uma resistividade de 550 $\Omega.m$, localizada a uma profundidade de 63.5 m e com um nível piezométrico de 312.5 m.

Na tabela 3.2 apresenta-se um resumo dos valores de resistividade eléctrica, profundidade do nível hidrostático, nível piezométrico e espessura das camadas saturadas detectadas pelos modelos de cada sondagem.

Tabela 3.2: Valores de resistividade eléctrica, profundidade, espessura e nível piezométrico das camadas saturadas geradas pelos modelos

SEV	Cota (m)	Profundidade do Nível hidrostático (m)	Nível Piezométrico (m)	Espessura (m)	Resistividade ($\Omega.m$)
PA 1	339	40	299	-	550
PA 2	292	70	222	-	550
PA 3	341	40	301	-	400
PA 4	296	37	259	-	400
PA 5	343	36.8	306.2	-	550
PA 5A	343	36.3	306.7	-	550
PA 6	365	57.5	307.5	35	550
PA 6*	365	92.5	272.5	-	280
PA 7	376	63.5	312.5	-	550

* : Camada saturada inferior.

3.3.2- Relação entre a qualidade da água e a resistividade de uma camada saturada

A resistividade de uma camada saturada obtida pela interpretação de uma curva SEV, representa na realidade a resistividade do conjunto terreno mais água.

Para se obter a resistividade eléctrica da água contida no subsolo, de modo a calcular a qualidade da água em termos de sólidos totais dissolvidos (STD), utiliza-se a equação 2.7 definida na secção 2.4.2 por Archie (1950), que descreve a relação entre a resistividade de uma camada saturada e a resistividade da água denominada de Factor de Formação (F).

A partir dessa relação, e usando um valor de resistividade de água com concentrações de STD aceitáveis, estabelece-se um valor mínimo de resistividade *bulk* que representa uma camada saturada que poderá ser utilizada para consumo humano.

Para os basaltos da ilha Terceira, Teixeira *et al* (2006) e Frohlich e Berbereia (2000), determinaram um Factor de Formação de 10. Assim, para um F de 10, é estimado que camadas saturadas com resistividades acima de 130 $\Omega.m$, indicam um aquífero de boa qualidade em termos de STD. Resistividades abaixo desse valor são suspeitas de conter águas com elevada mineralização.

O valor de 130 $\Omega.m$ foi obtido usando uma resistividade de água de 13 $\Omega.m$, o que equivale a uma concentração de STD de 500 ppm, considerados pela EPA (Environmental Protection Agency) o limite máximo para consumo humano.

Os valores de resistividade das camadas saturadas detectadas pelas sondagens (tabela 3.2) apresentam bons valores de qualidade em termos de sólidos totais dissolvidos.

3.4- Discussão de um modelo hidrogeológico para a zona

De acordo com os dados acima apresentados, é possível individualizar três massas de água subterrâneas suspensas na zona de estudo (Figura 3.12). As massas de água estão divididas em três zonas de acordo com um modelo hidrológico que teve como princípio fundamental a correlação do nível piezométrico das camadas saturadas detectadas pelas sondagens.

Na Zona A temos uma mais superficial com o nível piezométrico situado sensivelmente entre os 300 e 310 m, na Zona B outra mais profunda com um nível piezométrico na ordem dos 259 m e uma terceira na Zona C com um nível piezométrico por volta dos 222 m.

- **Zona A**

A massa de água subterrânea nesta zona, foi detectada pelas sondagens realizadas a altitudes superiores acima dos 330 m (PA 1, PA 3, PA 5, PA 5A, PA 6 e PA 7). Corresponde provavelmente a um aquífero bastante contínuo e muito espesso, com pelo menos 35 m de espessura, conforme indicado pela sondagem PA 6, que se desenvolve nesse sector na caldeira dos Cinco Picos. O modelo hidrogeológico mostra a correlação entre as referidas sondagens, onde é possível observar a massa de água subterrânea com resistividades que oscilam entre os 500 $\Omega \cdot m$ e os 550 $\Omega \cdot m$ no mesmo nível piezométrico (300 a 310 m).

Esta massa hídrica foi detectada por Anderson *et. al* (1981) na mesma área durante as campanhas de prospecção geofísica do projecto geotérmico da ilha Terceira, tendo esses autores admitido uma grande espessura saturada. Teixeira *et al* (2006) e Frohlich e Berbereia (2000) detectaram também massas de água subterrânea com um nível piezométrico sensivelmente localizado à mesma altitude, respectivamente nas zonas do Paul (Lagoa da Junco) e nas imediações do aterro sanitário da ilha Terceira.

Na sondagem PA 6 verifica-se resistividades relativamente mais baixas num nível inferior localizado a sensivelmente 272 m de altitude. Estas poderão indiciar uma camada de terreno mais porosa (*e.g.* zonas de *clinker*, depósitos piroclásticos ou lavas muito fracturadas), ou ainda um nível aquífero profundo com água mais mineralizada.

Localização de Massas de Água Subterrânea por Nível Piezométrico

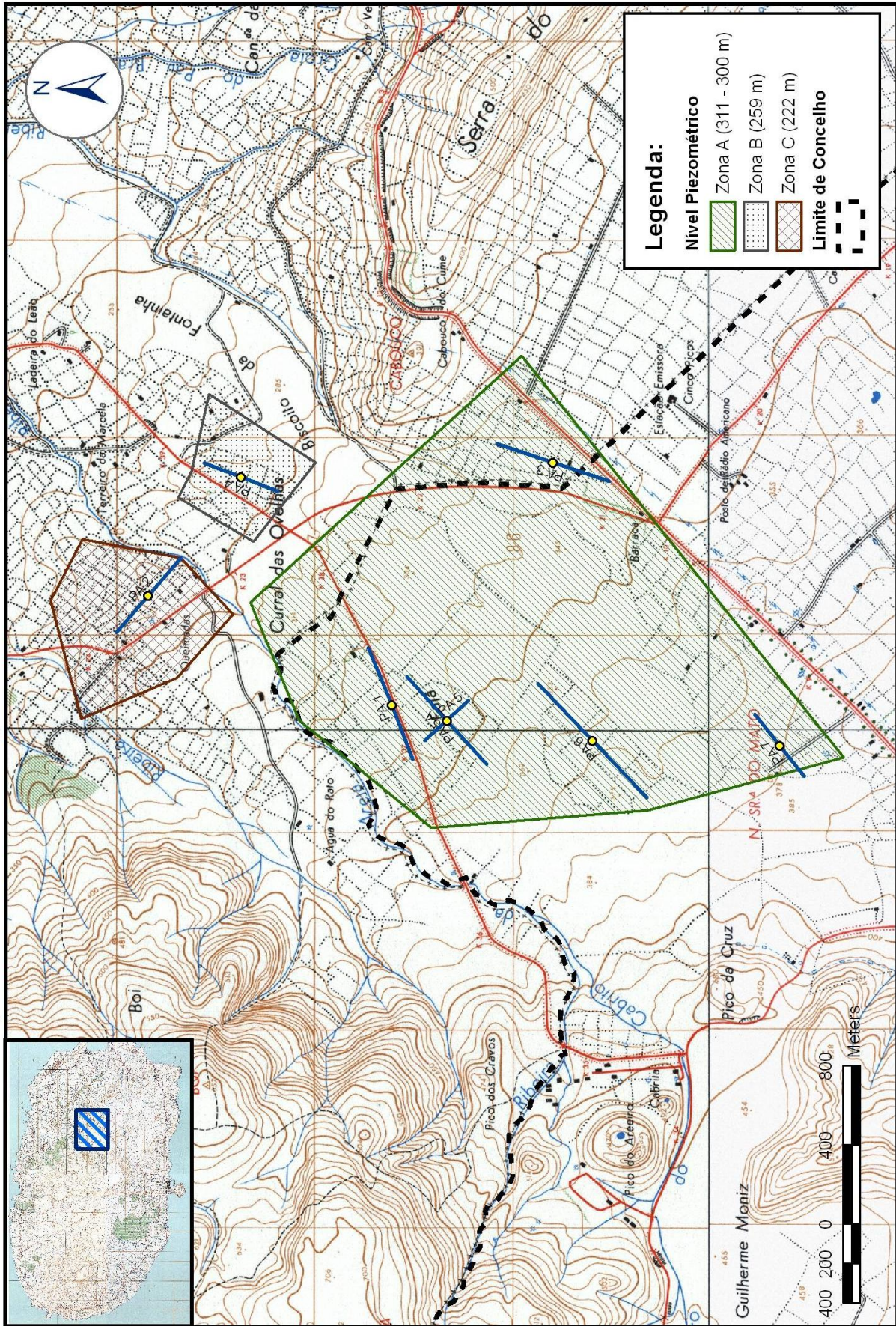


Figura 3.12: Localização de massas de água subterrânea com diferentes níveis piezométricos

- **Zona B e C**

As outras duas massas de água foram apenas detectadas por uma sondagem cada, PA 4 para a zona B e PA 2 para a Zona C. Essas duas zonas serão descritas em conjunto por se encontrarem ambas fora dos limites da Caldeira dos Cinco Picos.

O modelo hidrogeológico não mostra a correlação no nível piezométrico entre ambas as sondagens e as restantes localizadas na Zona A (222 m para Zona B e 259 m para Zona C), apenas é identificada na resistividade do aquífero da medição PA 2. O valor mais baixo de resistividade da sondagem PA 4 é possível por ser uma água mais mineralizada ou com um subsolo mais poroso ou mais fragmentado.

A não correlação entre as medições da Zona B e C com as da zona A deve-se ao facto de estarem a uma cota inferior (292 m para PA 2 e 296 m para PA). A não correlação entre ambas deve-se muito provavelmente ao facto da Zona C se encontrar do outro lado da falha da ribeira da Areia, assinalada na Carta 1:25 000 nas Figuras 3.1, 3.3 e 3.4.

É importante referir que apesar da não correlação entre as três zonas, as massas de água poderão pertencer ao mesmo aquífero, estando provavelmente segmentados pela presença de falhas.

3.5- Sumário e Conclusões

De acordo com os resultados obtidos, é possível individualizar nas zonas onde se realizaram os perfis massas de água subterrâneas suspensas.

Na Zona A foi detectada uma provável massa de água subterrânea, que aparenta uma grande continuidade lateral e que se desenvolve pelo menos em toda a metade Norte da caldeira dos Cinco Picos. Apresenta uma espessura provável de 35 m, correspondendo a resistividades eléctricas que oscilam entre os 500 $\Omega.m$ e os 550 $\Omega.m$.

Tendo igualmente como referência a cota da sondagem PA 1, essa massa de água subterrânea encontra-se sensivelmente a uma profundidade de 40 m, indo até aos 63.5 m tendo como referência a sondagem PA 7.

Este corpo hídrico parece apresentar alguma heterogeneidade nos níveis mais profundos provavelmente associado a uma camada do terreno mais porosa, ou água mais mineralizada, reflectida em resistividades eléctricas na ordem dos 350 $\Omega.m$.

Na Zona B e C as massas de água subterrânea aparentam ser menos contínuas que na Zona A. Limitações do terreno impediram mais medições para averiguar a sua continuidade.

A Zona B apresenta uma provável massa de água subterrânea suspensa correspondente a uma resistividade de 400 Ω .m. Esta localiza-se a uma profundidade de 37 m e com um nível piezométrico disposto a 259 m.

A Zona C apresenta uma provável massa de água subterrânea suspensa correspondente a uma resistividade de 550 Ω .m, localizada a uma profundidade de 70 m e com um nível piezométrico de 222 m.

Deste modo conclui-se que a melhor zona para a instalação de furos de captação de água para consumo humano é na Zona A, principalmente na área onde se fez as sondagens PA 1, PA 5 e PA 5A.

A Zona B também é uma boa área para captação de água. A provável massa de água subterrânea tem contudo uma extensão menor.

A zona C é a menos aconselhável por ter o aquífero a uma profundidade muito superior (70 m) que as restantes zonas apresentadas.

Em relação à qualidade da água em termos da concentração de sólidos totais dissolvidos, todas as zonas têm bons valores, por apresentarem resistividades do aquífero superiores a de 130 Ω .m.

4- Caso de Estudo II: *Estudo Geológico e Geotécnico da Zona de Construção da 8.^a Célula do Aterro Intermunicipal da Ilha Terceira*

4.1- Introdução

No presente capítulo, é apresentado o caso de estudo II que consiste numa campanha de prospecção geoelectrica realizada como complemento a um estudo geológico e geotécnico de uma bolsa para um aterro sanitário, que foi realizado a pedido dos Serviços Municipalizados de Angra do Heroísmo.

Será apenas apresentada a parte do estudo geotécnico relacionada com a prospecção geoelectrica, visto a restante não ser relevante para a presente dissertação.

A pedido dos Serviços Municipalizados da Câmara Municipal de Angra do Heroísmo, efectuou-se um estudo geológico e geotécnico na zona de construção da 8.^a célula do Aterro Intermunicipal da Ilha Terceira de acordo com as cláusulas técnicas descritas no Caderno de Encargos.

O plano de trabalhos deste estudo incluiu uma pesquisa bibliográfica, um reconhecimento da superfície do terreno e uma campanha de prospecção geofísica (prospecção geoelectrica) tendo em vista obter informações sobre a escavabilidade/ripabilidade do maciço, métodos de escavação necessários e localização de eventuais massas de água subterrânea até aos 100 m de profundidade.

O reconhecimento de superfície objectivou-se para a caracterização in situ da zona do ponto de vista geológico, geomorfológico, tectónico, hidrológico e geotécnico. Os trabalhos de campo realizaram-se no mês de Março de 2009.

Os trabalhos de prospecção geoelectrica objectivaram-se para a identificação de massas de água subterrânea subjacentes à zona de estudo e para a aferição da espessura dos estratos rochosos e terrosos. Procurou-se identificar aquíferos suspensos, uma vez que as características geológicas da zona são propícias à existência deste tipo de massas de água. Os trabalhos de campo realizaram-se no mês de Abril de 2009.

4.2- Caracterização da zona de estudo

4.2.1- Enquadramento geomorfológico

O Aterro Intermunicipal da Ilha Terceira localiza-se no extremo Oeste da Caldeira dos Cinco Picos (Figura 4.1), numa zona atravessada por uma escoada lávica basáltica recente.

Do ponto de vista topográfico esta área tem um declive baixo. Na zona atravessada pelas lavas, a morfologia do tipo *aa* da escoada imprime ao terreno um micro relevo acentuado.

Na área em estudo, os solos são incipientes, na sua maior parte do tipo litólico. Nas múltiplas depressões ou cavidades rochosas existem pequenas manchas de matéria orgânica acumulada.

Grande parte da zona de estudo foi profundamente alterada por actividade antrópica recente, associada à deposição de entulhos, solos, cascalho e resíduos diversos.

A Noroeste e Sudeste da zona de estudo existem duas bolsas de deposição de resíduos que estão em exploração.

4.2.2- Enquadramento geológico e tectónico

A zona de estudo localiza-se ao longo do Rift da Terceira, um alinhamento vulcano-tectónico de expressão regional, de tendência direccionada 145° NNW-SSE. Esta estrutura engloba na parte subaérea da ilha o estratovulcão dos Cinco Picos e a caldeira do mesmo nome.

A SW da zona em estudo localiza-se um dos limites da Caldeira dos Cinco Picos – a falha da Serra da Ribeirinha – que apresenta uma atitude linear de orientação 145° NNW-SSE (Figura 4.1 e Figura 4.2).

Localização da Zona de Estudo

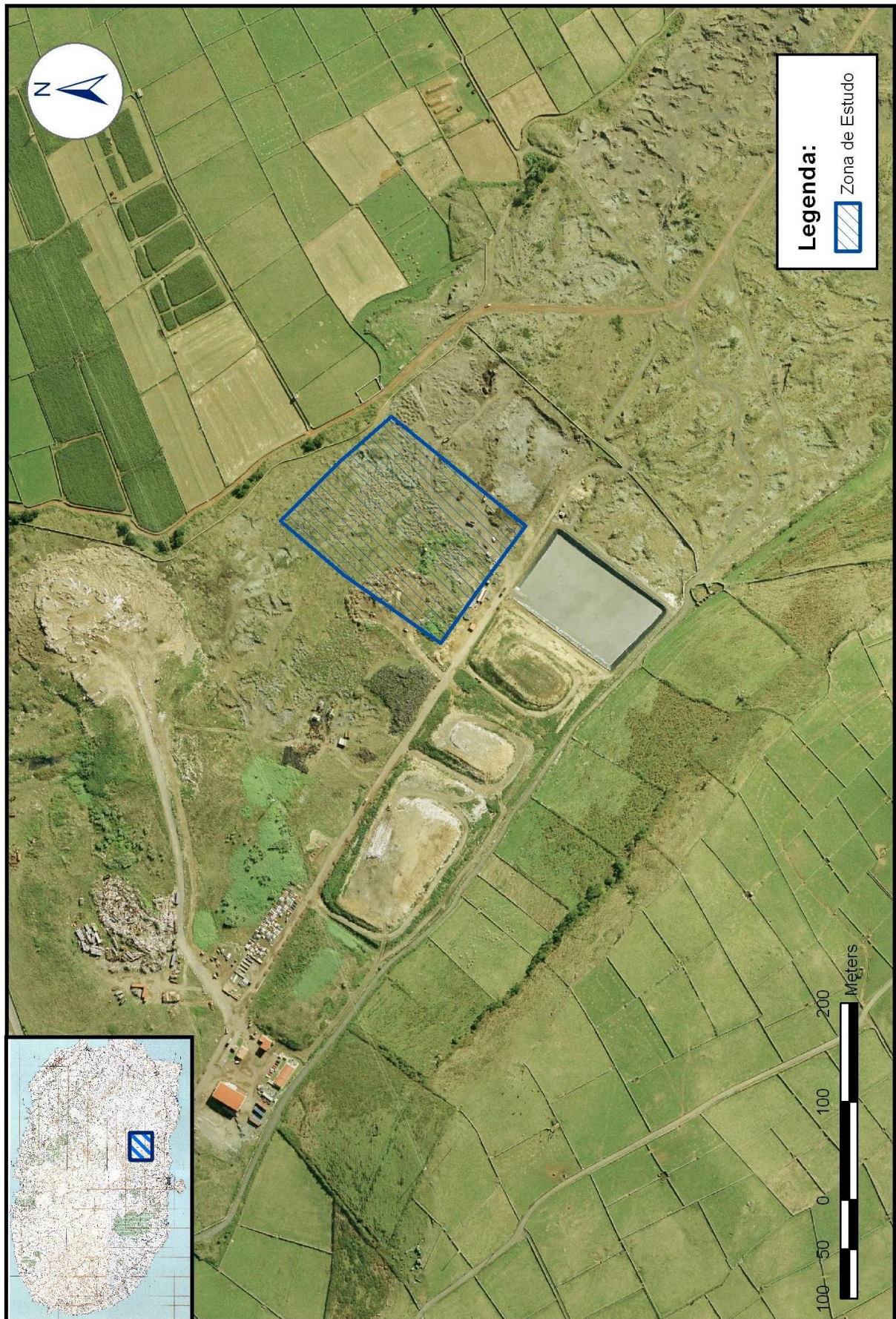
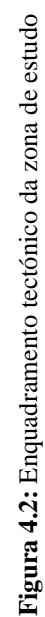


Figura 4.1: Localização da zona de estudo



De acordo com a carta geológica da ilha Terceira, Rodrigues (2002), o substrato geológico da zona interceptada por este trabalho é constituído pelas seguintes formações (Figura 4.3):

- (1) Formação traquibasáltica dos Cinco Picos;
- (2) Formação basáltica inferior;
- (3) Formação basáltica superior do Algar do Carvão.

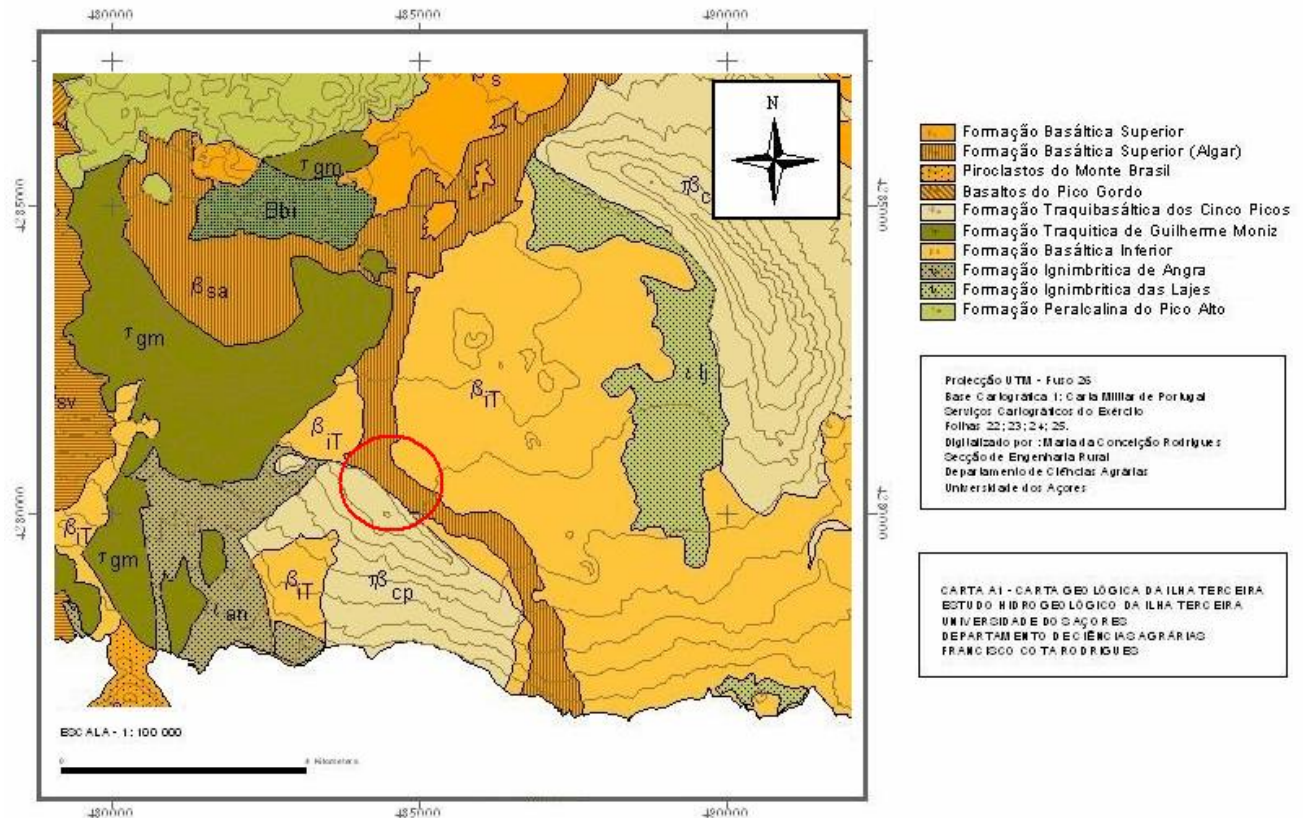


Figura 4.3: Carta geológica da zona de estudo

A formação traquibasáltica dos Cinco Picos, a mais antiga da ilha, forma o substrato litológico de todo o estratovulcão dos Cinco Picos. É formada por escoadas lávicas intermédias, que surgem normalmente alternadas por níveis piroclásticos pouco desenvolvidos. Não são conhecidos afloramentos desta formação na zona de estudo, inferindo-se contudo a sua presença a partir da geologia circundante (afloramentos dispostos ao longo da escarpa de falha da Serra da Ribeirinha).

Os basaltos inferiores são constituídos por escoadas lávicas e depósitos piroclásticos de natureza basáltica, extruídos a partir de centros emissores dispostos no interior da caldeira dos Cinco Picos. Dispõe-se sobre as formações traquibasálticas dos Cinco Picos e, na zona em estudo, estão cobertos pela formação basáltica superior do Algar do Carvão. Afloram em pequenas manchas nas zonas de pastagem circundantes.

A formação basáltica superior do Algar do Carvão ocupa o nível estratigráfico superior da zona de estudo. É constituída por uma escoada lávica de natureza basáltica, emitida há aproximadamente 2 000 anos a partir de pequenos centros eruptivos localizados nas proximidades do Algar do Carvão. Estes materiais apresentam uma morfologia superficial muito irregular, típica de escoadas do tipo *aa*, com zonas compactas por vezes desenvolvidas (1.00 a 4.00 m de espessura) e extensas manchas dispostas em *clinker*.

Entre as formações basálticas superiores do Algar do Carvão e os basaltos inferiores existe um paleossolo, cuja espessura varia entre os 0.75 e os 3.00 m.

4.3- Prospeção Geolétrica

4.3.1- Trabalhos de Campo

Realizaram-se duas sondagens eléctricas verticais (SEV) utilizando o método Schlumberger (AT 1 e AT 2) na zona do aterro sanitário da ilha Terceira. Os trabalhos realizaram-se no mês de Abril de 2009.

4.3.1.1- Equipamento

O equipamento utilizado para induzir corrente eléctrica no solo e medir as resistividades aparentes foi um Terra Meter SAS 1000 da companhia ABEM. O SAS 1000 tem uma capacidade de transmitir uma corrente eléctrica ate 1000 mA de intensidade.

Os eléctrodos de corrente e de voltagem são de cobre. Para transmitir a corrente foram utilizadas duas roldanas contendo ambas 1000 m de cabo eléctrico.

4.3.1.2- Localização

As sondagens foram efectuadas no aterro sanitário, conforme o apresentado na Figura 4.4. As coordenadas UTM e altitude de cada uma das sondagens é apresentada na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Coordenadas UTM e altitude das sondagens eléctricas verticais

Sondagem	Latitude (m)	Longitude (m)	Altitude (m)
AT 1	4 281 254	484 732	318
AT 2	4 280 977	484 992	306

As sondagens foram efectuadas numa zona com solos litólicos, em contacto directo com o substrato lávico (Basaltos Superiores do Algar do Carvão).

Localização das Sondagens Eléctricas Verticais

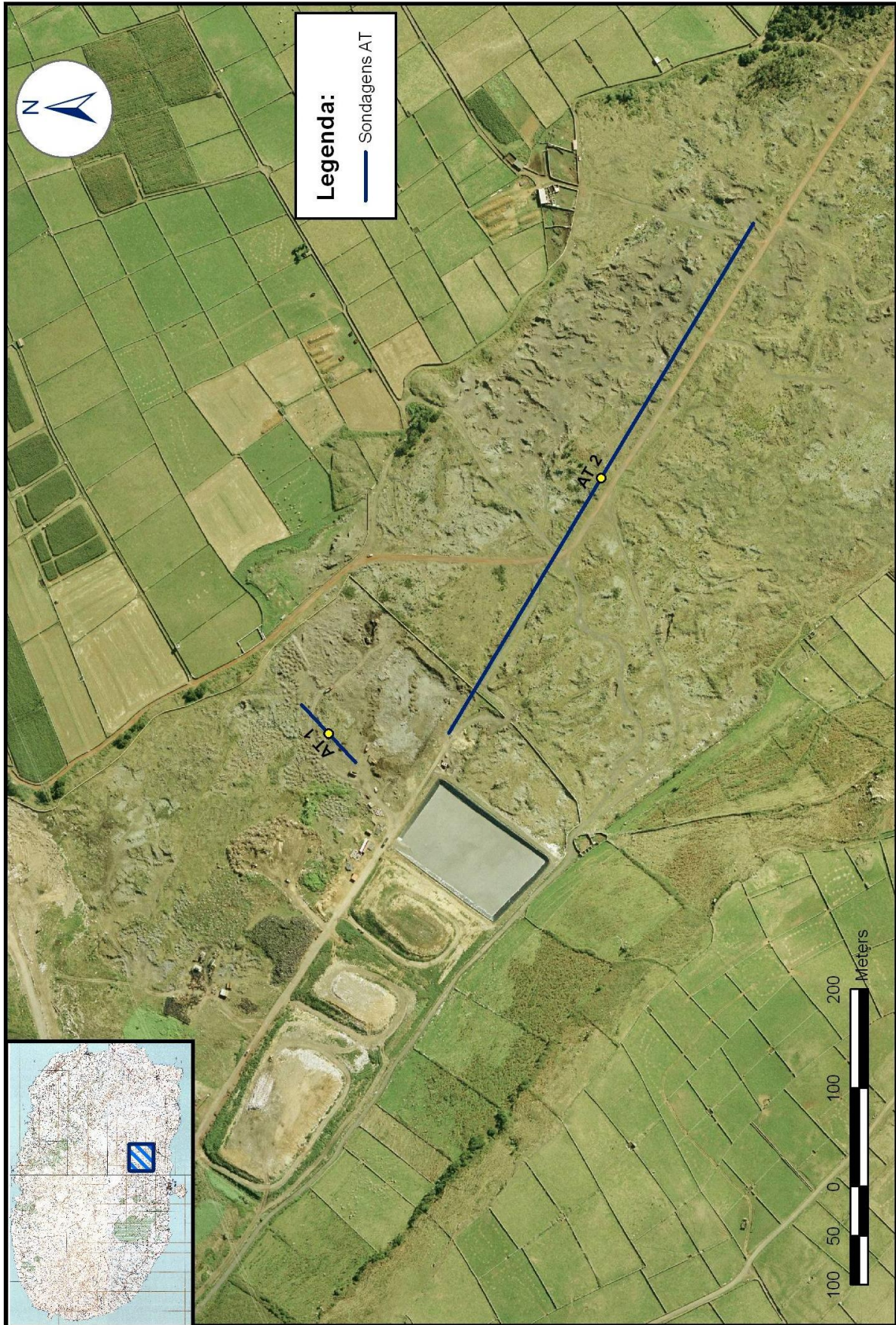


Figura 4.4: Localização das sondagens eléctricas verticais

4.3.1.3- Procedimentos

As medições foram efectuadas com o método Schlumberger, conforme descrito na secção 2.6.2.1.

O espaçamento AB/2 máximo atingido pelos eléctrodos de corrente em cada medição foi de 40 m para AT 1 e de 300 m para AT 2, de acordo com a limitação de espaço disponível no terreno.

A distância MN/2 dos eléctrodos de voltagem foi de 0.5 m para espaçamentos curtos de AB/2, e foi aumentado de acordo com o espaçamento máximo de cada medição para 1.5 m, 3 m ou 5 m.

Durante as medições no terreno as resistividades aparentes foram inseridas num gráfico de papel bilogarítmico, de modo a que qualquer erro durante as medições fosse passível de ser detectado e corrigido.

4.3.1.4- Condicionantes

A natureza litológica do terreno, o micro relevo acentuado e a exiguidade de espaço do terreno na área de estudo condicionaram a localização das sondagens e o espaçamento entre os eléctrodos A e B.

4.3.1.5- Interpretação das sondagens eléctricas verticais

As curvas de campo foram interpretadas utilizando-se o software de modelação “GEOMATE” da Universidade de Rhode Island, conforme descrito na secção 2.6.5.

As curvas modelo, as curvas de campo (ρ_a vs. AB/2) e os modelos gerados para cada sondagem são apresentados nas Figuras 4.5 a 4.6.

O modelo é representado no fundo de cada gráfico paralelamente ao eixo das distâncias AB/2, onde a espessura e profundidade de cada camada estão na mesma escala do eixo AB/2. As camadas saturadas de cada modelo estão representadas com riscas diagonais em azul.

Apenas a medição com maior espaçamento indicou a presença de uma camada saturada, associadas a contrastes pronunciados de resistividade nas camadas mais profundas e a gradientes negativos nas curvas de campo.

Os valores gerados pelos modelos para os basaltos não saturados variam entre os 900 $\Omega.m$ e os 8500 $\Omega.m$ de resistividade, dependendo da fracturação. Estes dados são concordantes com os obtidos por Teixeira *et al* (2006), Frohlich e Berbereia (2000) e Anderson *et. al* (1981) em medições efectuadas em escoadas lávicas da ilha Terceira.

Os basaltos saturados rondam os 500 $\Omega.m$ de resistividade, valor que depende dos sólidos totais dissolvidos (STD) na água (Zhdanov e Keller, 1994), também em concordância com os dados obtidos pelos referidos autores.

- Sondagem AT 1:

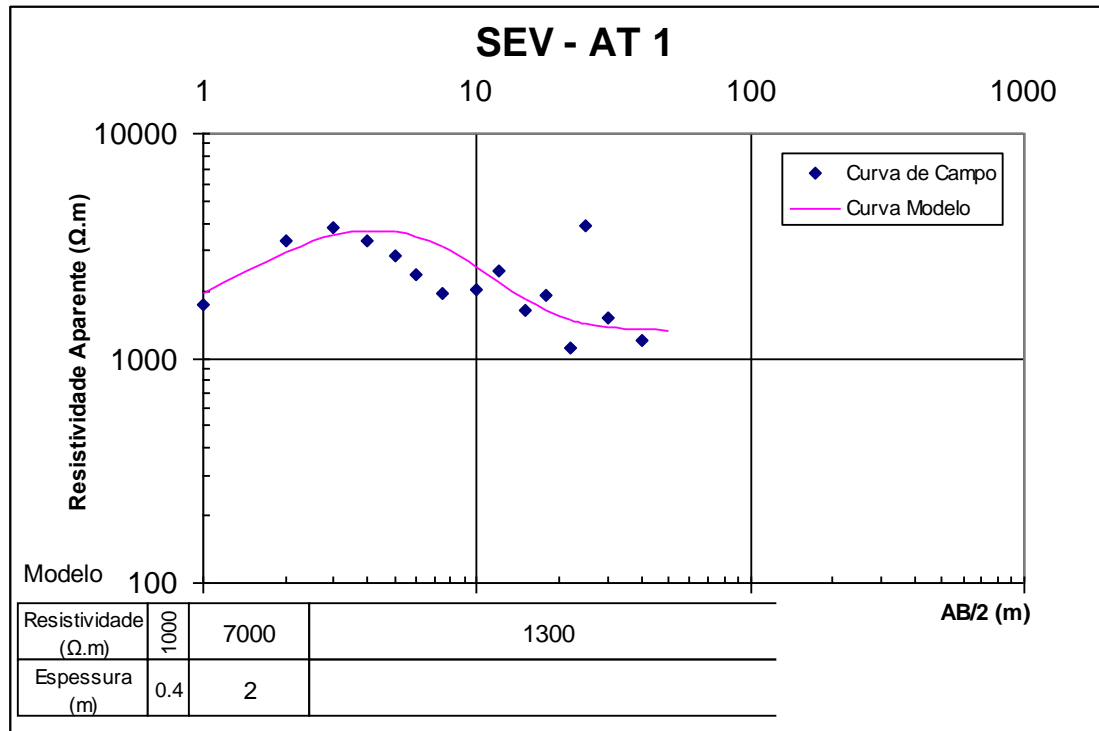


Figura 4.5: Sondagem eléctrica vertical AT 1, com a curva modelo mais coincidente e o respectivo modelo

A sondagem AT 1 foi realizada a uma altitude de 318 m com uma separação máxima de AB/2 de 40 m.

A curva de campo apresentada na Figura 4.5 caracteriza-se por uma subida da resistividade aparente até aos 3 m de AB/2, descendo até aos 40 m de AB/2. A partir dos 10 m de AB/2 verifica-se alguma dispersão dos valores de resistividades.

Essa sondagem corresponde a um modelo de três camadas, nenhuma das quais saturada.

A primeira camada do modelo tem uma espessura de 0.4 m, correspondendo a uma resistividade 1000 $\Omega.m$. Indicia a presença de um solo litólico incipiente.

A segunda camada, com uma espessura de 2 m, e uma resistividade de 7000 $\Omega.m$ indicia a presença de um substrato rochoso compacto que coincide com as escoadas basálticas que aflora no terreno.

O surgimento de valores de resistividade de 1300 $\Omega.m$ na terceira camada, a 2.4 m de profundidade, indica muito provavelmente a presença de formações rochosas com abundância de espaços vazios o que poderá corresponder a escoadas lávicas muito fracturadas, com níveis de

clinker e com depósitos piroclásticos intercalados. A dispersividade de resistividades aparentes observada indicia uma grande heterogeneidade litológica na terceira camada.

- Sondagem AT 2:

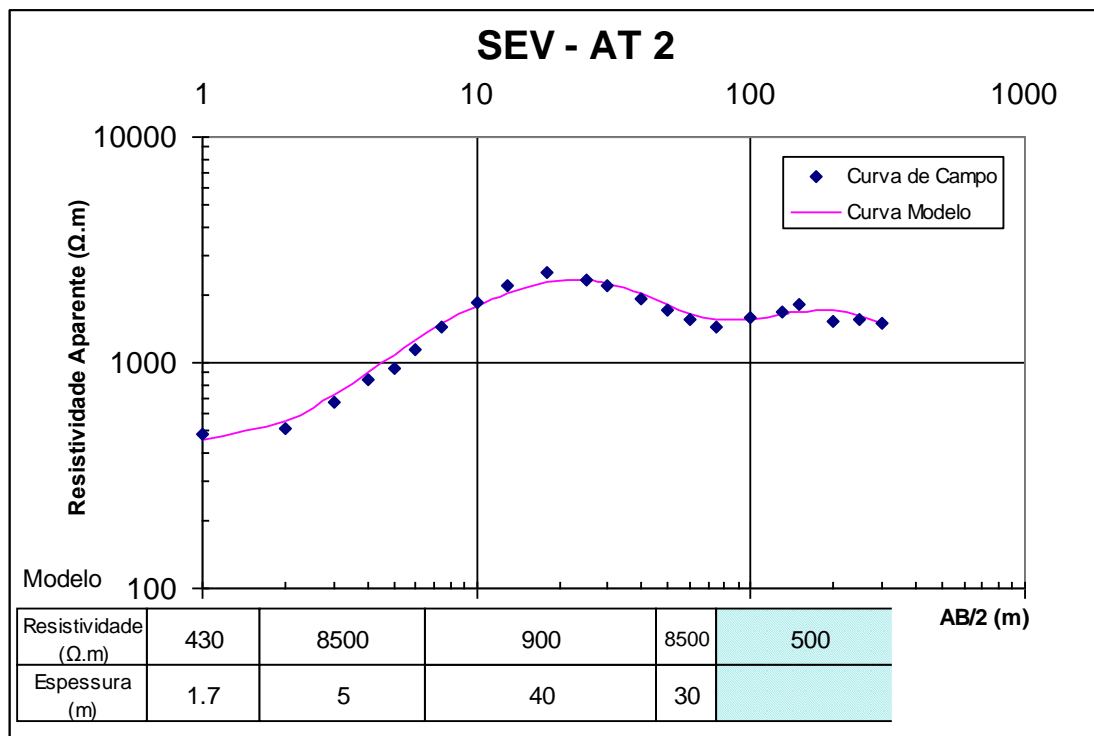


Figura 4.6: Sondagem eléctrica vertical AT 2, com a curva modelo mais coincidente e o respectivo modelo

A sondagem AT 2 foi realizada a uma altitude de 306 m com uma separação máxima de AB/2 de 300 m.

A curva de campo, apresentada na Figura 4.6, caracteriza-se por uma subida da resistividade aparente até aos 18 m de AB/2, descendo até aos 75 m de AB/2, voltando a subir ligeiramente até aos 150 m de AB/2, descendo depois ligeiramente até aos 300 m de AB/2.

Essa sondagem corresponde a um modelo de cinco camadas, uma das quais saturada.

A primeira camada com 1.7 m de espessura e com 430 Ω.m de resistividade corresponde ao substrato pedológico de natureza litólica.

A segunda camada com 5m de espessura e uma resistividade de 8500 Ω.m indicia a presença de um substrato rochoso compacto que coincide com as escoada basáltica que aflora no terreno. Esta formação coincide com a segunda camada identificada na sondagem AT 1.

O surgimento de valores de resistividade da ordem dos 900 Ω.m na terceira camada, a sensivelmente 7 m de profundidade e com uma espessura de 40 m, indica muito provavelmente a presença de formações rochosas com abundância de espaços vazios o que poderá corresponder a escoadas lávicas muito fracturadas, com níveis de *clinker* e com depósitos piroclásticos intercalados.

A quarta camada, correspondente a uma resistividade de 8500 $\Omega\cdot\text{m}$, indicia a presença de formações rochosas compactas localizadas a uma profundidade de 47 m e com uma espessura de 30 m.

A 77 m de profundidade, é possível individualizar uma quinta camada com uma resistividade baixa, 500 $\Omega\cdot\text{m}$, que corresponde a uma formação rochosa saturada.

4.3.2- Relação entre a qualidade da água e a resistividade de uma camada saturada

A resistividade de uma camada saturada obtida pela interpretação de uma curva SEV, representa na realidade a resistividade do conjunto terreno mais água.

Para se obter a resistividade eléctrica da água contida no subsolo, de modo a calcular a qualidade da água em termos de sólidos totais dissolvidos (STD), utiliza-se a equação 2.7 definida na secção 2.4.2 por Archie (1950), que descreve a relação entre a resistividade de uma camada saturada e a resistividade da água denominada de Factor de Formação (F).

A partir dessa relação, e usando um valor de resistividade de água com concentrações de STD aceitáveis, estabelece-se um valor mínimo de resistividade *bulk* que representa uma camada saturada que poderá ser utilizada para consumo humano.

Para os basaltos da ilha Terceira, Teixeira *et al* (2006) e Frohlich e Berbereia (2000), determinaram um Factor de Formação de 10. Assim, para um F de 10, é estimado que camadas saturadas com resistividades acima de 130 $\Omega\cdot\text{m}$, indicam um aquífero de boa qualidade em termos de STD. Resistividades abaixo desse valor são suspeitas de conter águas com elevada mineralização.

O valor de 130 $\Omega\cdot\text{m}$ foi obtido usando uma resistividade de água de 13 $\Omega\cdot\text{m}$, o que equivale a uma concentração de STD de 500 ppm considerado pela EPA (Environmental Protection Agency) o limite máximo para consumo humano.

O valor de resistividade da camada saturada detectada pela sondagem AT 2 apresenta bons valores de qualidade em termos de sólidos totais dissolvidos.

4.3.3- Síntese

De acordo com os resultados obtidos, é possível individualizar na área em estudo uma massa de água subterrânea suspensa a sensivelmente 77 m de profundidade e com um nível piezométrico a aproximadamente 294 m.

Entre a superfície e os cinco metros de profundidade é espectável encontrar-se uma escoada lávica relativamente compacta com alguns níveis de *clinker*.

Entre os 5 e os 20 m de profundidade é espectável encontrarem-se escoadas lávicas pouco espessas com níveis de *clinker* desenvolvidos intercaladas por depósitos piroclásticos de queda.

5- Correlação entre Caso de Estudo I e dois Furos de captação

5.1- Introdução

No presente capítulo é apresentada a caracterização do furo de captação F12 das Fajãs da Agualva, e do furo SB3-Achada, cujos aquíferos foram detectados pelas sondagens eléctricas verticais do Caso de Estudo I, apresentado no Capítulo 3, e a correlação entre os furos e as sondagens.

O caso de estudo I foi elaborado a pedido da Praia Ambiente, de acordo com o anteriormente referido, com o objectivo de identificar massas de água subterrânea e a melhor zona para a localização de um furo de captação.

O furo F12 das Fajãs foi executado entre os dias 28 de Agosto e 28 de Setembro de 2009, pelas Sondagens Batalha para a Empresa Municipal Praia Ambiente, em função dos resultados das sondagens efectuadas no âmbito desse caso de estudo.

O furo SB3-Achada foi executado entre os dias 14 de Setembro e 18 de Outubro de 2009, pela mesma empresa, para os Serviços Municipalizados de Angra do Heroísmo.

5.2- Caracterização dos Furos de Captação

5.2.1- Furo F12 das Fajãs da Aqualva

À presente data o furo ainda não se encontra em exploração pela Praia Ambiente, estando apenas perfurado e com a tubagem selada. Os dados referentes à caracterização deste furo foram retirados do relatório de execução do mesmo, elaborado pelas Sondagens Batalha.

5.2.1.1- Localização

O Furo F12 está localizado na zona das Fajãs da Aqualva no extremo norte da Caldeira dos Cinco Picos, conforme apresentado na figura 5.1, a uma altitude de 330 m e com as seguintes coordenadas UTM: (485 628 m; 4 286 609 m).

A sua localização é na Zona A do modelo hidrogeológico sugerido pelo caso de estudo I, nas proximidades das sondagens eléctricas verticais PA 1, PA 5 e PA 5A, conforme apresentado na Figura 5.1.

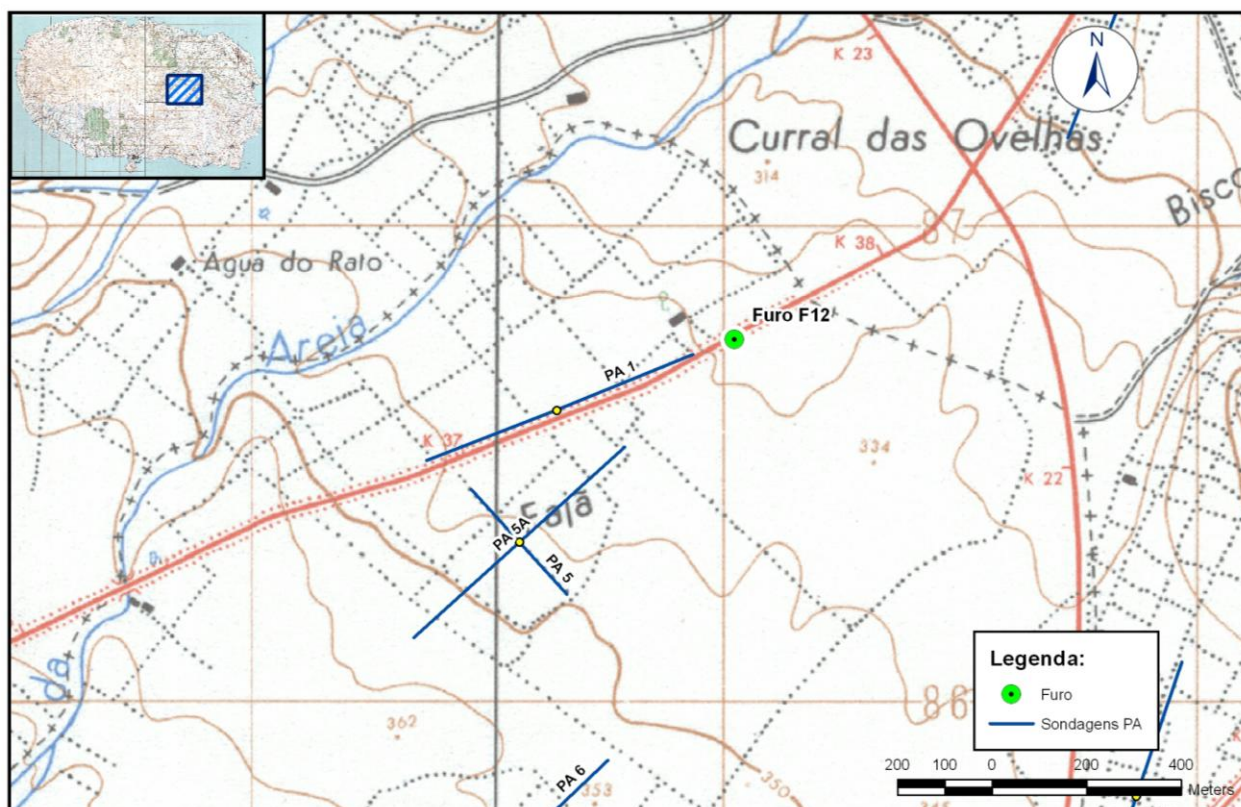


Figura 5.1: Localização do Furo F12 das Fajãs da Aqualva

5.2.1.2- Log do furo

Na Figura 5.2 é apresentado o *log* do Furo F12, que foi elaborado de acordo com as amostras recolhidas nos solos durante a perfuração.

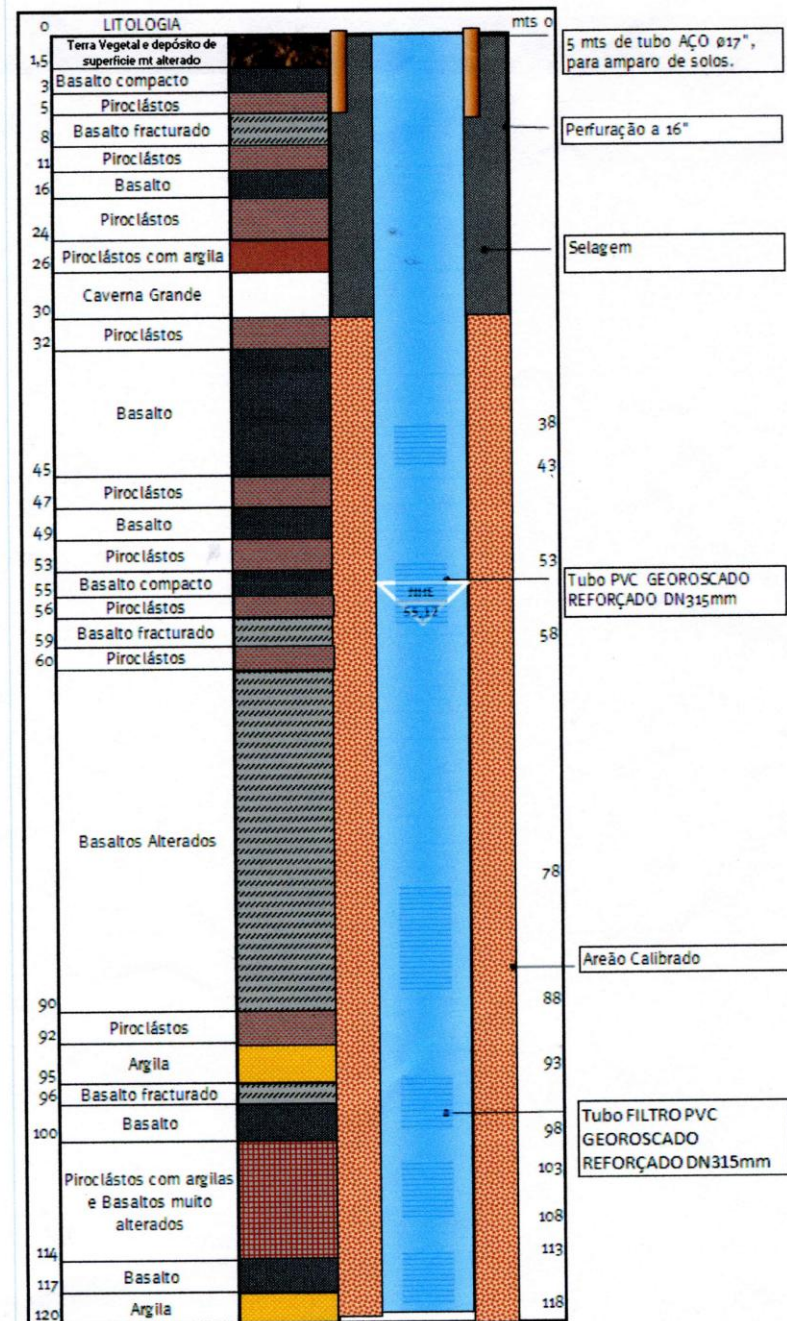


Figura 5.2: Log do furo F12 das Fajãs da Agualva.

A estrutura tubular tem uma profundidade de 120 m e um diâmetro de 17'' até aos 5 m e de 16'' dos 5 m até aos 120 m. Atravessa litologias constituídas por escoadas basálticas, regra geral de

pouca espessura mas com grande extensão (tipo *aa*), alternando com níveis de piroclastos, tanto de projecção e queda, como de escoada em alternância, conforme descrito por Rodrigues (2002).

O Furo de captação parece ter sido executado, conforme descrito na secção 3.2.2 do Caso de Estudo I, sobre litologias correspondentes à formação de Basaltos Inferiores, caracterizada por escoadas de lava de pequena espessura e intercalados por depósitos de piroclastos (Rodrigues, 2002).

A caracterização específica das litologias atravessadas é a apresentada no *log* do furo (Figura 5.2). Pode-se verificar que a partir da primeira camada de Terra Vegetal, com 1,5 m de espessura, existe alguma heterogeneidade nas camadas basálticas não saturadas, alternando entre basaltos compactos a fracturados e piroclastos. A camada de maior espessura é de basalto, com 13 m de espessura, localizada a uma profundidade de 32 m.

A sensivelmente 55 m de profundidade foi localizada uma massa de água subterrânea associado a um depósito de basaltos alterados com níveis argilosos, e de piroclastos intercalados.

5.2.1.3- Ensaio de Caudal

Para a realização de um ensaio de caudal foi necessário a montagem de uma bomba submersível a 80 m de profundidade, incluindo todo o equipamento auxiliar, adequado às características da captação. O ensaio teve uma duração de 4320 minutos (72 horas) de bombeamento, mais 180 minutos (três horas) de recuperação.

As medições de caudal foram efectuadas para os seguintes caudais de extracção: 11.1 L/s; 13.89 L/s e 18.89 L/s; a um nível hidrostático de 55.12 m e um nível hidrodinâmico de sensivelmente 73.40 m.

5.2.2- Furo SB3-Achada

O furo SB3 encontra-se em exploração pelos Serviços Municipalizados de Angra do Heroísmo. Os dados referentes à caracterização deste furo foram retirados do relatório de execução do mesmo, igualmente elaborado pelas Sondagens Batalha.

5.2.2.1- Localização

O Furo está localizado na zona da Achada na Caldeira dos Cinco Picos, conforme apresentado na figura 5.3, a uma altitude de 360 m e com as seguintes coordenadas UTM: (484 300 m; 4 283 000 m).

Encontra-se localizada na região sul da Zona A do modelo hidrogeológico sugerido pelo caso de estudo I, perto da sondagem eléctrica vertical PA 7, conforme apresentado na Figura 5.3.

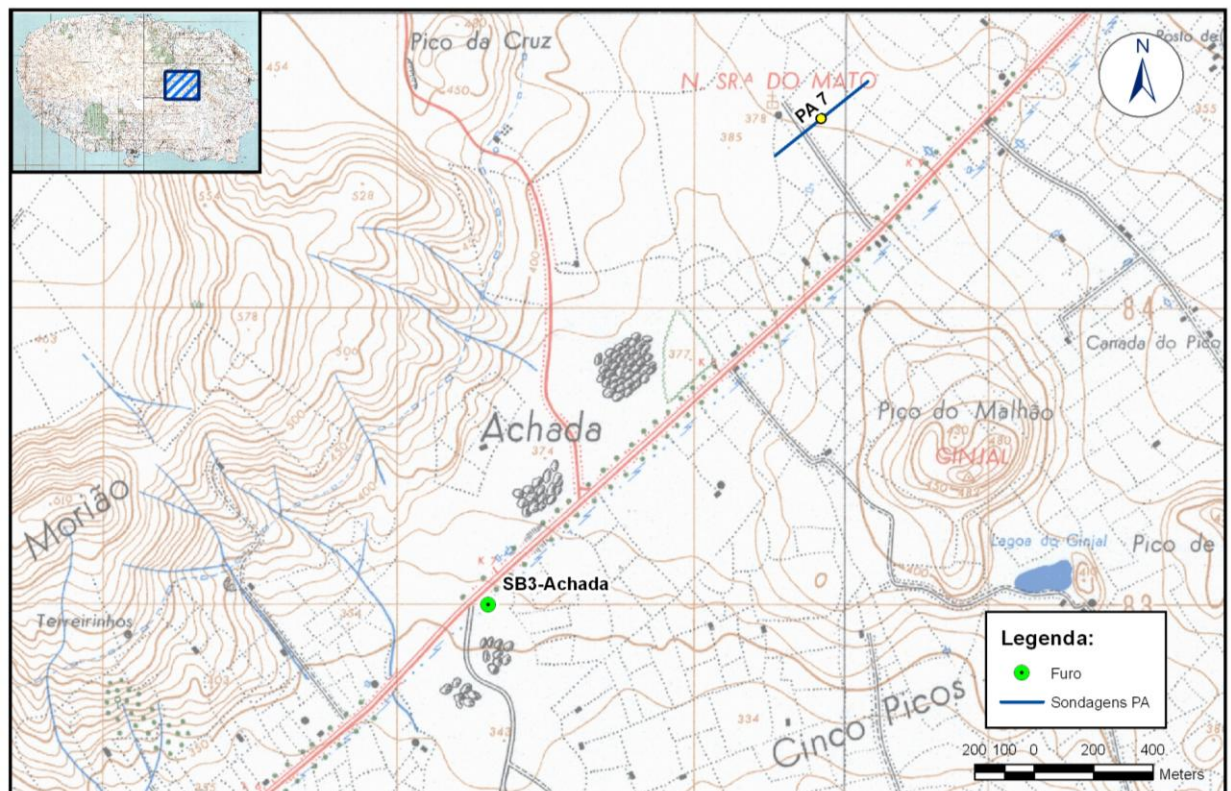


Figura 5.3: Localização do Furo SB3-Achada

5.2.2.2- Log do furo

Na Figura 5.4 é apresentado o *log* do furo SB3-Achada que foi elaborado de acordo com as amostras recolhidas dos solos durante a perfuração.

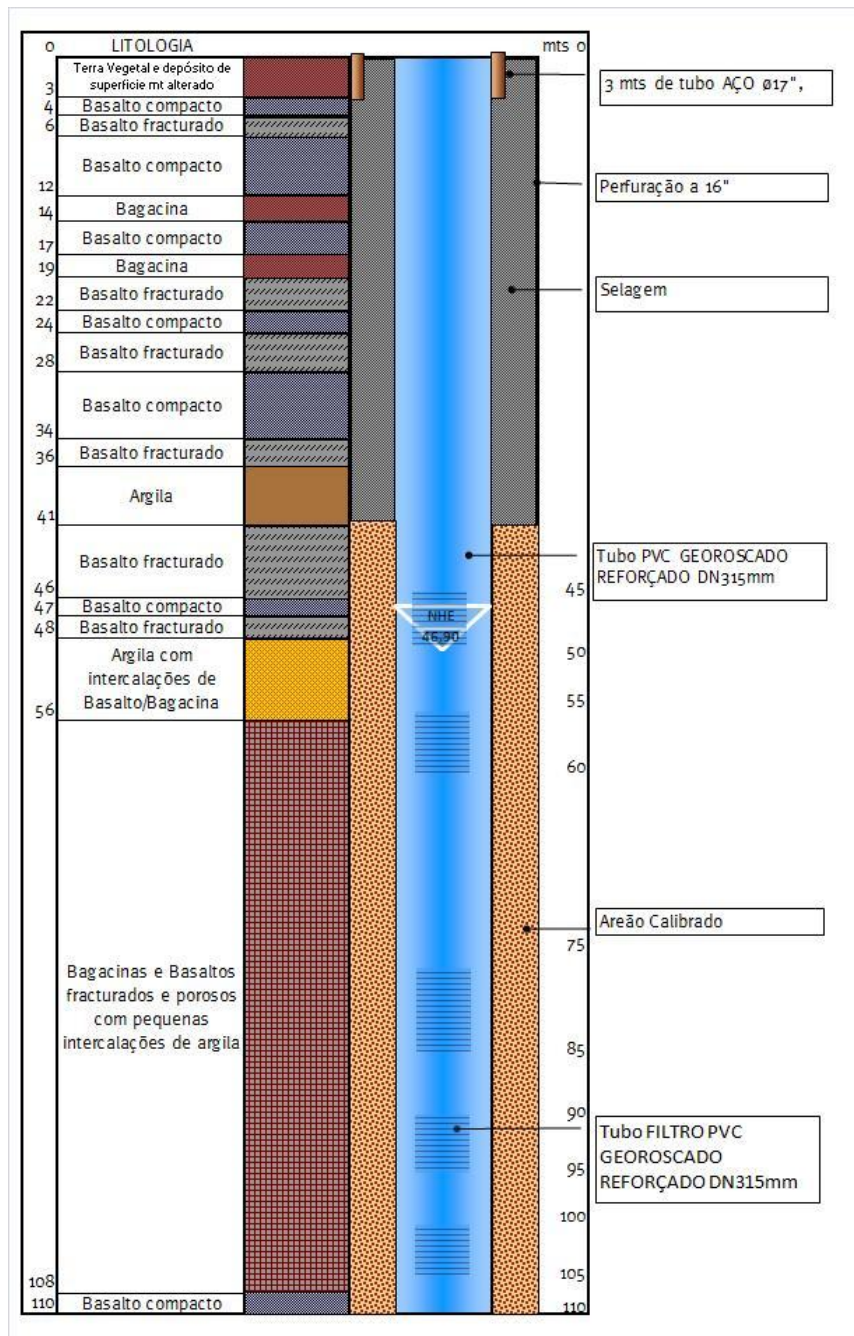


Figura 5.4: Log do furo SB3-Achada.

A estrutura tubular tem uma profundidade de 110 m, com um diâmetro de 20'' até aos 5 m e de 16'' dos 5 m até aos 110 m. Atravessa litologias constituídas por escoadas basálticas, regra geral de pouca espessura, mas com grande extensão (tipo aa), alternando com níveis de piroclastos,

tanto de projecção e queda, como de escoada em alternância, conforme descrito por Rodrigues (2002).

O Furo de captação parece ter sido executado, conforme descrito na secção 3.2.2 do Caso de Estudo I, sobre litologias correspondentes à formação de Basaltos Inferiores, caracterizadas por escoadas de lava de pequena espessura e intercaladas por depósitos de piroclastos (Rodrigues, 2002).

A caracterização específica das litologias atravessadas é a apresentada no *log* do furo (Figura 5.2). Pode-se verificar que a partir da primeira camada de Terra Vegetal, com 3 m de espessura, existe heterogeneidade nas camadas não saturadas, alternando entre basaltos compactos a fracturados e bagacina, com a presença de uma camada de argila a 36 m de profundidade.

A sensivelmente 47 m de profundidade foi localizada uma massa de água subterrânea associado a um depósito de basaltos fracturados com bagacina e intercalações de argila.

5.2.2.3- Ensaio de Caudal

O ensaio teve uma duração de 4320 minutos (72 horas) de bombeamento, mais 420 minutos (sete horas) de recuperação.

As medições de caudal foram efectuadas para os caudais de extracção de 16.60 L/s e 20 L/s; a um nível hidrostático de 47 m e um nível hidrodinâmico de sensivelmente 71.98 m.

5.3- Correlação entre os Furos e as sondagens eléctricas verticais

Pode-se desde já afirmar que existe correlação entre as sondagens eléctricas verticais do caso de estudo I e o Furo das Fajãs da Agualva, porque o Furo foi executado na área indicada pelos trabalhos de prospecção geoelectrica e foi encontrado o aquífero que as sondagens eléctricas verticais detectaram.

Contudo é importante verificar o nível de correlação, comparando o *log* do furo com os modelos hidrogeológicos apresentados pelas sondagens eléctricas verticais do caso de estudo I e tentar afinar modelos e parâmetros hidráulicos.

A tabela 5.1 mostra os níveis piezométricos das sondagens eléctricas verticais que representam a Zona A do modelo hidrogeológico, e os níveis dos furos de acordo com os *logs*. As sondagens eléctricas verticais PA 1 e PA 7 serão tidas como referência para a correlação dos furos F12 e SB3, respectivamente, por se localizarem mais próximas dos furos.

Tabela 5.1: Profundidades e níveis piezométricos das sondagens eléctricas verticais e dos Furos F12 das Fajãs da Agualva e SB3-Achada

SEV	Furo	Cota (m)	Profundidade do Nível Hidrostático (m)	Nível Piezométrico (m)
PA 1	-	335	36	299
PA 5	-	343	36.8	306.2
PA 5A	-	343	36.3	306.7
PA 6	-	365	57.5	307.7
PA 7	-	376	63.5	312.5
-	F12	330	55	275
-	SB3	360	47	313

De acordo com a tabela 5.1, pode-se verificar que o nível piezométrico do aquífero captado pelo furo F12 encontra-se a uma cota inferior da camada saturada indicada pelas sondagens; o aquífero está 24 m mais profundo tendo como referência a SEV PA 1. Esta diferença está na espessura menor da terceira camada do modelo da SEV PA 1 (33 m) em relação à espessura da camada não saturada do *log* do furo (55 m). A primeira camada de terra vegetal do furo está correlacionada com a do modelo da SEV PA 1, havendo uma diferença de 1,4 m, que é normal visto o centro da sondagem PA 1 não estar paralelo ao furo.

Isto poderá estar relacionado com o problema de não – singularidade e com o efeito da resistividade lateral, conforme descrito nas secções 2.6.5.1 e 2.6.5.2, respectivamente.

O efeito da resistividade lateral deve – se provavelmente à heterogeneidade dos diferentes tipos de basalto das camadas não saturadas até à saturada, conforme é indicado no *log*, e à falha da Ribeira da Areia localizada perto das sondagens eléctricas verticais conforme apresentado na Figura 3.1 do caso de estudo I. O efeito da resistividade lateral está a afectar todas as sondagens eléctricas verticais que constituem o modelo hidrológico da Zona A do caso de estudo I, uma vez que estão correlacionadas, indicado a mesma massa de água subterrânea ao nível piezométrico de sensivelmente 300 m.

O efeito da resistividade lateral na sondagem PA 7 parece ser menor, uma vez que apresenta uma cota piezométrica ligeiramente superior (312,5 m). Isso deve-se ao facto de ser a sondagem mais afastada da falha da Ribeira da Areia. Também é possível que por a SEV PA 7 se apresentar numa cota topográfica mais elevada, e que devido às heterogeneidades verificadas pelos *logs* dos furos, o aquífero ao longo da Zona A determinada pelo caso de estudo I tenha diferentes níveis piezométricos.

Para estimar o problema de não – singularidade da sondagem PA 1 apresenta-se na Figura 5.5 um modelo para a SEV PA 1, que tenha o mesmo nível piezométrico da camada saturada do furo, para verificar se a curva modelo gerada continua a coincidir com a curva de campo. Foi ajustada a terceira camada não saturada do modelo por ser a que apresenta uma espessura diferente. A escolha da sondagem PA 1 deve – se ao facto de ser a mais próxima do furo, e por ser a sondagem onde se verifica alguma influência de resistividades laterais a partir do espaçamento AB/2 de 75 m, onde os valores das resistividades aparentes apresentam algumas variações, não formando uma curva perfeita.

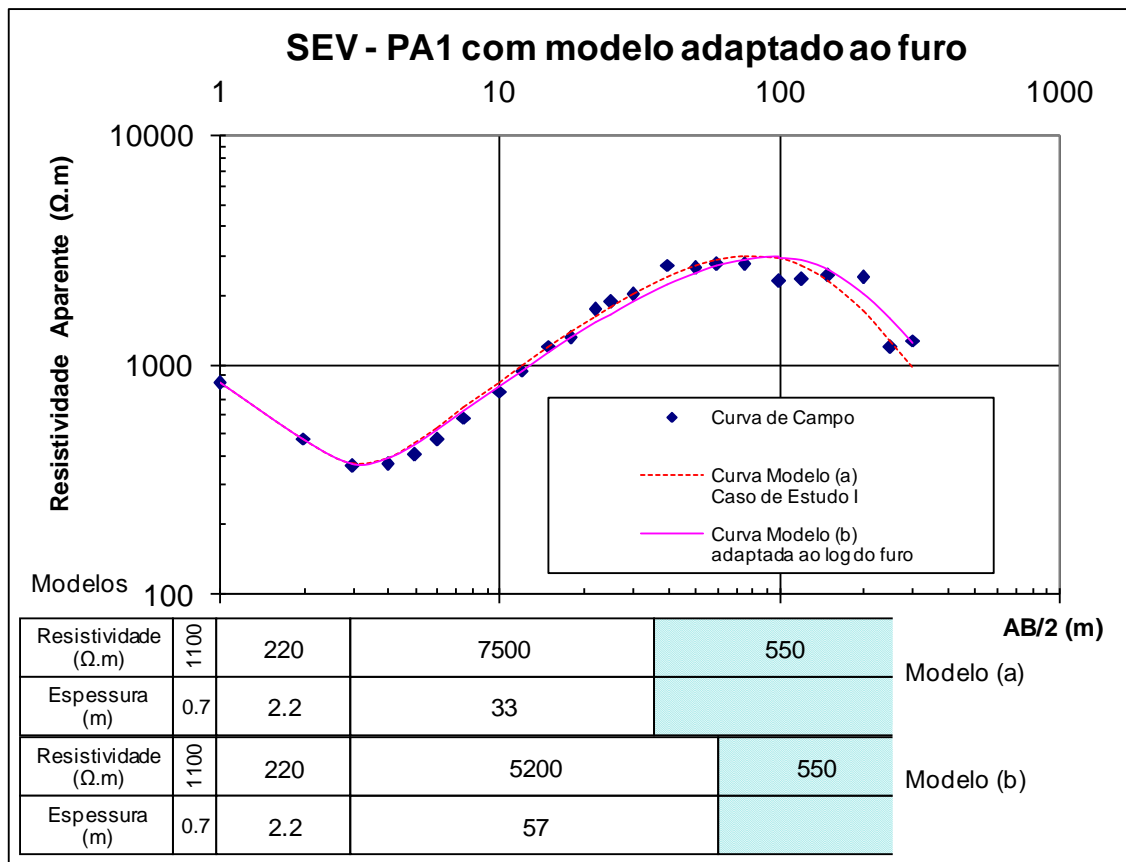


Figura 5.5: Sondagem eléctrica vertical PA 1, com a curva modelo do caso de Estudo I e a curva modelo adaptada ao *log* do furo.

A Figura 5.5 mostra que a curva modelo (b), gerada por um modelo em que a terceira camada tem mais 24 m de espessura e uma resistividade eléctrica menor, mas dentro dos valores típicos para basaltos compactos, também é coincidente com a curva de campo e, deste modo, corresponde a um modelo válido que representa sem erros a realidade do subsolo retratado pelo *log* do furo.

Apesar de representar o problema de não–singularidade, este caso está mais relacionado com a existência de resistividades laterais, porque as duas curvas modelo representadas na Figura apenas coincidem com a curva de campo devido às resistividades aparentes da curva de campo

estarem algo dispersas a partir do espaçamento AB/2 de 75 m. A partir deste espaçamento as duas curvas modelo afastam-se uma da outra, e se não existisse a dispersão de valores, formando deste modo uma curva suave como nos espaçamentos AB/2 até os 75 m, apenas uma das curvas modelo coincidiria com a de campo e apenas um modelo seria válido. Se esse fosse o caso, o problema de não-singularidade iria sempre existir, mas não com uma diferença de 24 m de espessura no total das camadas não saturadas dos dois modelos.

Em suma, pode-se concluir que existe correlação entre as sondagens eléctricas verticais e o furo F12 das Fajãs da Agualva. Contudo, deve ter-se em especial atenção o problema da não-singularidade em solos vulcânicos, porque este é mais acentuado neste tipo de solos, devido às resistividades laterais provocadas pela heterogeneidade de materiais, bem como à maior probabilidade de presença de falhas.

Em relação ao furo SB3-Achada, pode-se verificar, de acordo com a Tabela 5.1, que o nível piezométrico do aquífero captado pelo furo SB3 encontra-se à mesma cota da camada saturada indicada pela sondagem PA 7, e deste modo, concluir que existe correlação entre o furo e a sondagem.

Fazendo uma comparação entre os dois furos de captação, verifica-se que a diferença de cotas topográficas é de 30 m, e que a diferença de níveis piezométricos é de 38 m, ou seja, uma diferença de oito metros. Visto a diferença de oito metros ser insignificante, os dois furos estarem distanciados 1200 m entre si e os substratos apresentarem muita heterogeneidade, é provável que os dois furos captem o mesmo aquífero a cotas diferentes.

Deste modo conclui-se que existe correlação entre os dois furos e as sondagens eléctricas verticais do caso de estudo I.

Para o furo F12 das Fajãs, a correlação já era esperada, uma vez que o furo foi executado de acordo com os resultados do caso de estudo.

Para o furo SB3-Achada, apesar de não ter sido executado, tendo em conta o caso de estudo, era espectável a correlação, uma vez que a Zona A determinada pelo caso de estudo representa um aquífero com uma grande extensão.

A correlação das camadas saturadas e não saturadas presentes no *log* do furo, com as camadas dos modelos das sondagens do caso de estudo I, permitem confirmar os valores de resistividade eléctrica, apresentados na bibliografia e em outros estudos, para basaltos secos e saturados.

5.3.1- Cálculo do Factor de Formação (F)

Uma vez estabelecida a correlação entre as sondagens eléctricas verticais do caso de estudo I e os furos F12 e SB3, o Factor de Formação para basaltos alterados (furo F12) e basaltos fracturados com bagacina (furo SB3), foram calculados.

O cálculo, apresentado na tabela 5.2, foi estabelecido com a resistividade eléctrica das camadas saturadas dos modelos das sondagens eléctricas verticais PA 1 e PA 7, e com a condutividade eléctrica da água das análises feitas aquando dos ensaios de caudal dos respectivos furos. As litologias foram retiradas dos respectivos *logs* dos furos.

Tabela 5.2: Factor de Formação calculado com as análises das águas dos furos e as camadas saturadas da SEVs PA 1 e PA 7

Furo F12 Fajãs da Agualva			Camada saturada SEV PA 1 (modelo b)		F
Nível Piezométrico (m)	Condutividade água ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ρ_w ($\Omega.\text{m}$)	Nível Piezométrico (m)	ρ_b ($\Omega.\text{m}$)	
275	128	78.3	275	550	7
Furo SB3-Achada			Camada saturada SEV PA 7		F
Nível Piezométrico (m)	Condutividade água ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ρ_w ($\Omega.\text{m}$)	Nível Piezométrico (m)	ρ_b ($\Omega.\text{m}$)	
313	138	72.46	312.5	550	7.59

ρ_b : Resistividade eléctrica da camada saturada do modelo, ρ_w : Resistividade eléctrica da água do furo,
F: Factor de Formação calculado com a equação 2.7 (ρ_b / ρ_w)

A tabela 5.2 mostra que o Factor de Formação para basaltos alterados é de 7, e para basaltos fracturados com bagacina é de 7.59, valores esses inferiores ao Factor de Formação de 10 determinado para os basaltos da ilha Terceira por Frohlich e Berbereia (2000).

Como o Factor de Formação é influenciado também pela compactação dos materiais litológicos, essa diferença é aceitável porque o valor de 10 foi calculado noutra zona da caldeira dos Cinco Picos.

Outro factor a ter em conta no calculo dos Factores de Formação da tabela 5.2, é que as sondagens eléctricas verticais do caso de estudo I não foram efectuadas na mesma altura que o ensaio de caudal dos furos. Assim, a água dos aquíferos podem apresentar diferentes tempos de resistência, e deste modo, apresentarem diferentes valores de condutividade eléctrica da água, por estes serem influenciados pela concentração de STD.

Deste modo, para uma melhor aferição do valor do Factor de Formação de 7 e 7.59, deverá ser feita uma recolha para amostra da água do furo, no mesmo dia em que é feita uma sondagem eléctrica vertical paralela ao furo. Assim, a resistividade eléctrica da camada saturada obtida pelo modelo da sondagem e a condutividade eléctrica da amostra de água do furo, serão obtidos com o mesmo tempo de residência.

6- Correlação entre Caso de Estudo II e Furo SB-P1/AH do Aterro

6.1- Introdução

No presente capítulo é apresentada a caracterização do furo de monitorização SB-P1/AH do Aterro Sanitário da Ilha Terceira, cujo aquífero foi detectado por uma sondagem eléctrica vertical, inerente ao Caso de Estudo II apresentado no capítulo 4, e a correlação entre o furo e a sondagem.

O caso de estudo II foi elaborado como complemento a um estudo geológico e geotécnico da oitava célula do Aterro Sanitário da Ilha Terceira, que foi realizado a pedido dos Serviços Municipalizados de Angra do Heroísmo.

O furo SB-P1/AH já existia aquando da realização das sondagens eléctricas verticais do caso de estudo II. Foi durante a interpretação dos resultados que se verificou que o aquífero do furo tinha sido detectado.

6.2- Caracterização do Furo SB-P1/AH

Os dados referentes à caracterização deste furo foram retirados do relatório de execução do mesmo, elaborado pelas Sondagens Batalha.

6.2.1- Localização

O Furo SB-P1/AH está localizado nas proximidades do Aterro Sanitário da ilha Terceira, perto da sondagem eléctrica vertical AT 2, conforme apresentado na figura 6.1, a uma altitude de 306 m e com as seguintes coordenadas UTM: (4 281 851 m; 484 647 m).

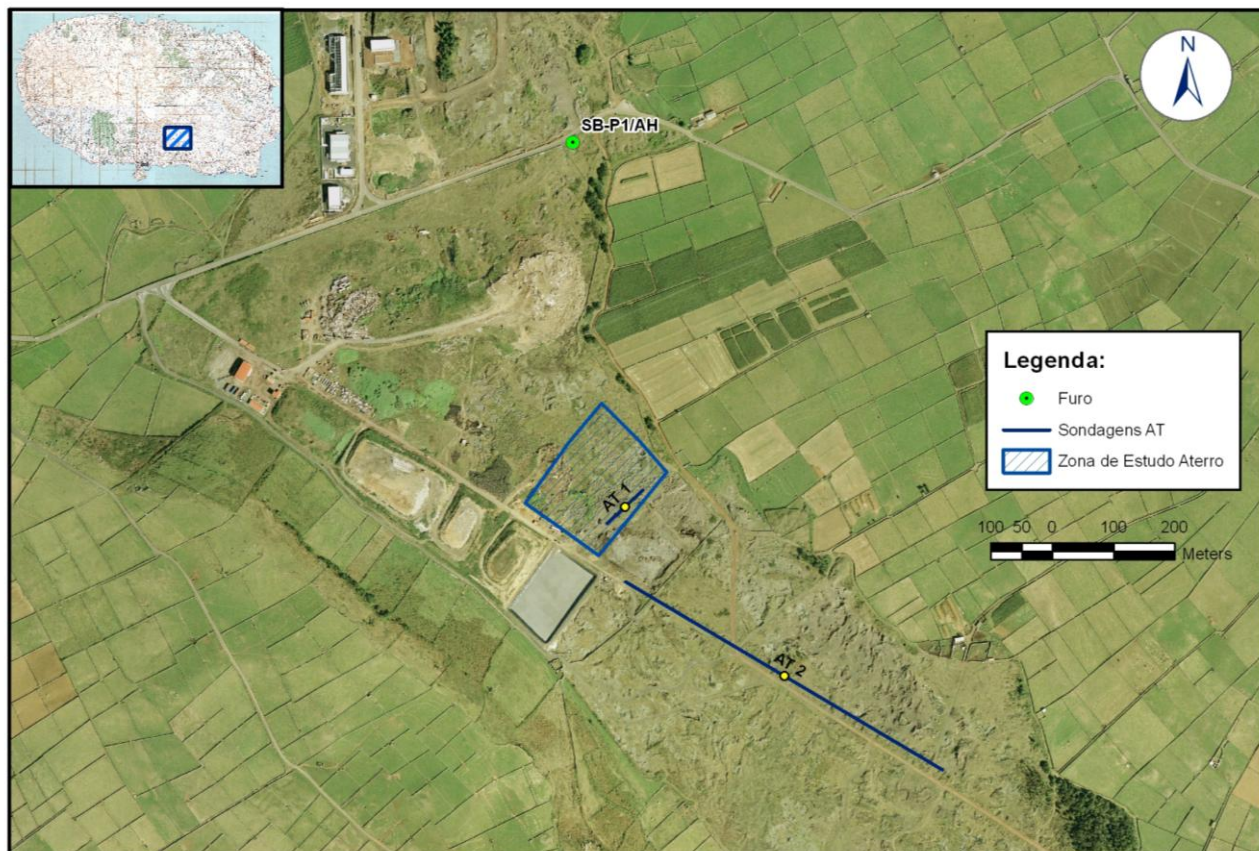


Figura 6.1: Localização do Furo SB-P1/AH

6.2.2- Log do furo

Na Figura 6.2 é apresentado o *log* do Furo SB-P1/AH que foi elaborado de acordo com as amostras recolhidas dos solos durante a perfuração.

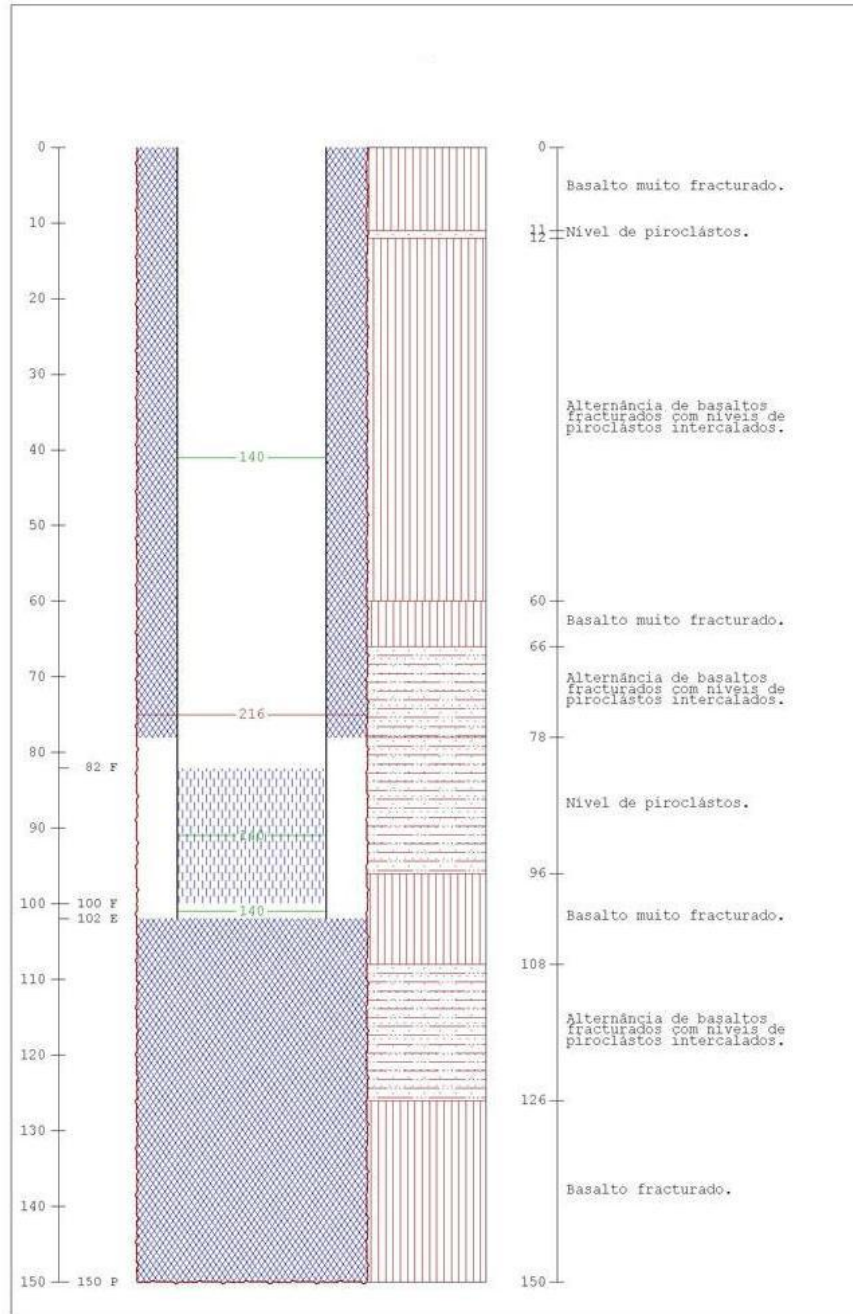


Figura 6.2: Log do furo SB-PA1/AH.

A estrutura tubular tem uma profundidade de 150 m e um diâmetro de 8''1/2 até aos 25 m e de 12''1/4 dos 25 m até aos 150 m. Atravessa litologias constituídas por escoadas basálticas pouco espessas e com níveis de clinker, associadas a depósitos piroclásticos de queda.

O Furo de captação parece ter sido executado, conforme descrito na secção 4.2.2 do Caso de Estudo I, sobre litologias correspondentes à formação de Basaltos Inferiores, caracterizada por escoadas de lava de pequena espessura e intercaladas por depósitos de piroclastos (Rodrigues, 2002).

A caracterização específica das litologias atravessadas é a apresentada no *log* do furo (Figura 6.2). Existe alternância nas camadas não saturadas entre basaltos muito fracturados, níveis de piroclastos e basaltos fracturados intercalados com piroclastos. A camada de maior espessura corresponde a uma de basaltos fracturados intercalados com piroclastos, com 48 m de espessura, localizada a uma profundidade de 12 m.

A sensivelmente 78 m de profundidade foi identificada uma massa de água subterrânea associada a um depósito piroclástico de queda com níveis argilosos intercalados.

6.2.3- Ensaio de Caudal

As medições de caudal instantâneo efectuadas indicaram, de acordo com o relatório, um caudal de extracção óptimo do piezómetro de 1 100 L/h a aproximadamente 93 m, um nível hidrostático de 77.5 m e um nível hidrodinâmico de sensivelmente 80 m.

6.3- Correlação entre o Furo e as sondagens eléctricas verticais

A tabela 6.1 mostra a profundidade do nível hidrostático e o nível piezométrico da camada saturada detectada pela sondagem eléctrica vertical AT 2 e os níveis do furo de acordo com o *log*.

Tabela 6.1: Profundidades e níveis piezométricos da sondagem eléctrica vertical e do Furo SB-PA1/AH

SEV	Furo	Cota (m)	Profundidade do Nível Hidrostático (m)	Nível Piezométrico (m)
AT 2	-	306	77	229
-	SB-PA1/AH	318	78	240

De acordo com a tabela 6.1, pode-se verificar que o nível piezométrico do aquífero captado pelo furo encontra-se a uma cota superior da camada saturada indicada pela sondagem, o aquífero está 11 m mais elevado em relação à SEV AT 2. Pode-se também verificar que esta é a praticamente a mesma diferença de cotas topográficas, uma vez que o furo está 12 m mais elevado em relação ao centro da sondagem AT 2.

Atendendo a que o centro da sondagem AT 2 se encontra a uma distância de sensivelmente 1000 m do furo, à diferença de cotas topográficas e às características do subsolo na área de influência da medição eléctrica vertical e do furo corresponderem a solos heterogéneos, considera-se que é perfeitamente aceitável a diferença obtida entre os níveis piezométricos.

Deste modo, conclui-se que existe correlação entre a SEV AT 2 e o furo de monitorização SB-PA1/AH do aterro. Contudo, deve ter-se sempre em atenção o problema da não-singularidade.

Apesar da existência da correlação, o objectivo do caso de estudo II foi de complemento a um estudo geotécnico. Se tratasse de detecção de água subterrânea, teriam sido necessárias mais sondagens eléctricas verticais para se obter conclusões mais fiáveis.

A correlação das camadas saturadas e não saturadas, presentes no *log* do furo, com as camadas do modelo da SEV AT 2, permitem confirmar os valores de resistividade eléctrica, apresentados na bibliografia e em outros estudos, para basaltos secos e saturados.

6.3.1- Cálculo do Factor de Formação (F)

Uma vez estabelecida correlação entre a sondagem eléctrica vertical SEV AT 2 e o furo SB-PA1/AH do aterro, foi calculado o Factor de Formação para depósitos de piroclastos. O cálculo, apresentado na tabela 6.2, foi feito com a resistividade eléctrica da camada saturada do modelo da sondagem eléctrica vertical AT 2, e com a média da condutividade eléctrica da água retirada das análises de monitorização do furo. A litologia foi retirada do *log* do furo.

Tabela 6.2: Factor de Formação calculado com as análises da água do furo e a camada saturada da SEV AT 2.

Furo SB-PA1/AH do Aterro			Camada saturada SEV AT 2		F
Nível Piezométrico (m)	Condutividade água ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ρ_w ($\Omega\cdot\text{m}$)	Nível Piezométrico (m)	ρ_b ($\Omega\cdot\text{m}$)	
240	184	54.85	229	500	9.12

ρ_b : Resistividade eléctrica da camada saturada do modelo, ρ_w : Resistividade eléctrica da água do furo,
F : Factor de Formação calculado com a equação 2.7 (ρ_b / ρ_w)

A tabela 6.2 mostra que o Factor de Formação para depósitos de piroclastos é de 9.11, valor este mais próximo do Factor de Formação de 10 determinado para os basaltos da ilha Terceira por Frohlich e Berbereia (2000), e superior aos valores de 7.00 e 7.59 dos factores de formação inerentes ao caso de estudo I.

A diferença entre os factores de formação pode dever-se às diferenças litológicas entre a camada saturada de depósitos piroclásticos, do furo SB-PA1/AH do caso de estudo II, e as camadas saturadas de basaltos alterados do furo F12, e a basaltos fracturados com bagacina do furo SB3 do caso de estudo I.

À semelhança do cálculo do factor de formação do caso de estudo I, apresentado na secção 5.2.1, a sondagem eléctrica vertical não foi efectuada na mesma altura que os ensaios de monitorização do furo e, deste modo, os tempos de residência da água no aquífero poderão ser diferentes, resultando em diferentes valores de condutividade eléctrica.

7- Conclusões

As sondagens eléctricas verticais, apresentadas nos dois casos de estudo, mostraram capacidade para distinguir, em rochas vulcânicas com heterogeneidade litológica, camadas não saturadas com resistividades eléctricas elevadas, de camadas saturadas com resistividades eléctricas baixas.

No caso de estudo I, cujo objectivo era localizar e caracterizar massas de água subterrânea de modo a indicar a melhor localização de um furo de captação de água para consumo humano a ser executado pela empresa municipal Praia Ambiente, foi sugerida a sua melhor localização, com base nos resultados de oito sondagens eléctricas verticais.

No caso de estudo II, cujo objectivo foi servir de complemento a um estudo geológico e geotécnico, foi indicado, com base numa das duas sondagens eléctricas verticais, a existência de um aquífero na zona do aterro sanitário.

De modo a aferir a fiabilidade dos resultados apresentados nos dois casos de estudos, foram considerados três furos, dois de captação de água e um de monitorização da qualidade da água subterrânea nas imediações do Aterro Sanitário da ilha Terceira, e feita uma correlação dos *logs* dos furos com as sondagens eléctricas verticais mais próximas.

Os dois furos usados na correlação do caso de estudo I foram: o furo F12 das Fajãs da Agualva, que foi executado na Zona A em função dos resultados das sondagens efectuadas no âmbito desse caso de estudo; e o furo SB3-Achada, que foi executado igualmente nas imediações da Zona A, indicada pelo caso de estudo I como a melhor zona para a realização de furos de captação. O furo usado para ser correlacionado com a sondagem eléctrica vertical do caso de estudo II foi o furo SB-P1/AH do Aterro Sanitário, que se localiza nas imediações das sondagens do caso do estudo II.

Na correlação entre o furo F12 e a sondagem eléctrica vertical PA 1, verificou-se que havia uma diferença de 24 m entre os níveis piezométricos do furo e da camada saturada do modelo. Contudo, essa diferença foi corrigida, com a criação de um novo modelo, uma vez que estava presente o problema de não-singularidade, que é mais acentuado em rochas vulcânicas devido às resistividades laterais provocadas pela heterogeneidade deste tipo de rochas. Na correlação entre o furo SB3 e a sondagem eléctrica vertical PA 7, verificou-se que os níveis piezométricos do furo e da camada saturada do modelo eram iguais, havendo deste modo uma correlação directa.

Para o caso do estudo II, na correlação entre o furo SB-P1/AH e a sondagem eléctrica vertical AT 2, verificou-se uma diferença de 11 m entre os níveis piezométricos do furo e da camada saturada do modelo. Contudo, esta diferença é considerada normal porque o furo e a sondagem estão 1000 m distanciados um do outro em rochas heterogéneas, e porque é esta também a diferença de cotas topográficas entre ambos. Deste modo, considera-se existir uma correlação directa.

Uma vez que foi estabelecida correlação entre as sondagens eléctricas verticais e os furos de captação, foi possível calcular o Factor de Formação (F) para as litologias presentes nas camadas saturadas dos furos. Deste modo, foram calculados valores de Factor de Formação de 7.00 para a camada de basaltos alterados do furo F12, de 7.59 para a camada de basaltos fracturados com bagacina do furo SB3 e de 9.12 para a camada de depósitos de piroclastos do furo SB-P1/AH.

Em suma, concluiu-se, de acordo com os resultados obtidos na análise de correlação entre as sondagens eléctricas verticais dos dois casos de estudo e os furos de captação e de monitorização, que a aplicação de técnicas de prospecção geoeléctrica com o objectivo de detectar massas de água subterrânea são válidas para rochas vulcânicas.

No entanto, deve-se ter em especial atenção o problema da não-singularidade em rochas vulcânicas, como foi o caso da SEV PA 1, porque este é mais acentuado neste tipo de rochas, devido às resistividades laterais provocadas pela grande heterogeneidade de materiais e maior probabilidade de presença de falhas.

Contudo, mesmo para os casos em que os problemas da não-singularidade e da resistividade lateral sejam muito acentuados, considera-se que o método geoeléctrico é sempre útil na localização dos melhores locais para a exploração de água subterrânea, porque, na pior das hipóteses, permite indicar os locais onde não perfurar.

Na sequência dos dois principais problemas identificados no âmbito da realização desta Dissertação, sugere-se que em trabalhos futuros se estude o problema da não-singularidade, bem como da aferição dos valores do Factor de Formação, para os diferentes materiais vulcânicos.

Para o problema da não-singularidade, deverão ser efectuadas sondagens eléctricas verticais, paralelas ao maior número de furos de captação possível. O espaçamento máximo entre os eléctrodos de corrente deverá ser, se as condições do terreno assim o permitirem, de modo a atingir toda a profundidade de cada furo. Os modelos definidos deverão contemplar as camadas indicadas no *log* do furo, para que seja possível comparar e estabelecer um erro padrão típico expectável para rochas de origem vulcânica.

Para a aferição dos valores do Factor de Formação, as recolhas das amostras de água dos furos deverão ser realizadas no mesmo dia em que é feita a sondagem eléctrica vertical paralela aos furos. Assim, a resistividade eléctrica da camada saturada obtida através da sondagem e a condutividade eléctrica da amostra de água do furo, serão obtidas em simultâneo, minimizando a ocorrência de potenciais discrepâncias.

Referências Bibliográficas

Archie, G.E., 1950. *Introduction to petrophysics of reservoir rocks*. Bull. Am. Assoc. Pet. Geolo. 34 (5), 943 – 961.

Benson, A.K., Payne, K.L and Stubben, M.A., 1997. *Mapping groundwater contamination using DC resistivity and VLF geophysical methods – A case study*. Geophysics 62 (1), 80 – 86.

Custódio, E., 1978. *Geohidrologia de terrenos e islas volcánicas*. Instituto de hidrologia, Centro de estudos hidrográficos. Universidade Politécnica de Barcelona.

Fetter, C.W., 1994. *Applied hydrogeology*. Third edition. Prentice Hall, New Jersey.

Frohlich, R.K. and Berbereia, V.J.D., 2000. *Location of Groundwater Resources with Geoelectrical Depth Soundings - Terceira Azores*. Department of Geosciences. University of Rhode Island.

Frohlich, R.K. and Park, C.D., 1989. *The electrical resistivity of the vadose zone - field study*. Ground Water 27 (4), 175 – 184.

Frohlich, R.K. and Urish, D.W., 2002. *The use of geoelectrics and test wells for the assessment of groundwater quality of a coastal industrial site*. Journal of Applied Geophysics 50, 261 – 278.

Frohlich, R.K., 1996. *Geophysical Methods for Hydrogeologic and Contaminant Hydrology Applications*. URI Water Research Center, Department of Geology. University of Rhode Island.

Frohlich, R.K., 2000. *Environmental Engineering Geophysics*. Course GEO-CVE 485 Lecture manual. University of Rhode Island.

Frohlich, R.K., 2000. *Geoelectrical Depth Soundings – Terceira, Azores – for the evaluation of groundwater resources*. Preliminary report. Department of Geosciences. University of Rhode Island.

Frohlich, R.K., Fisher, J.J., Summerly, E., 1996. *Electric-hydraulic conductivity correlation in fractured crystalline bedrock, Rhode Island, USA*. Journal of Applied Geophysics 35, 249 – 259.

Frohlich, R.K., Urish, D.W., Fuller, J., O'Reilly, M., 1994. *Use of geoelectrical methods in groundwater surveys in a coastal environment*. Journal of Applied Geophysics 32, 139 – 154.

Giroux, B., 1999. *Géophysique appliquée II, methods électriques*. Notes de cours. École Polytechnique du Montreal.

Gosh, D.P., 1971. *The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements*. Geophysics Prospection, 19: 192 – 217.

Lloyd, E.F. and Collis, S.K., 1981. *Geothermal Prospection – Ilha Terceira Açores*, Geological report.

Machado, F., 1959. *Submarine pits of the Azores plateau*. Bull. Volc. 21: 109 – 116.

Orellana, E. and Mooney, H.M., 1966. *Master Tables and Curves for Vertical Electrical Sounding over layered structures*. Interciencia, Madrid.

Palacky, G.J., 1988. *Resistivity characteristics of geologic targets: in Nabighian, M.N. edition*. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Vol. 1, Theory. Society of Exploration Geophysicists. Tulsa, Oklahoma.

Rocha, R., Ramalho, E., Andrade Afonso, A., 2003. *Estimativa de Porosidades em Rochas Básicas a partir de Diagramas Eléctricos e Nucleares através de dois Métodos – um Estudo Comparativo*. Ciências da Terra (UNL), Lisboa, nº esp, CD-ROM, D73-D76.

Rodrigues, F.C., 2002. *Hidrogeologia da Ilha Terceira (Açores, Portugal)*. Tese de Doutoramento. Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias.

Sondagens Batalha, 2008. *Construção de Piezómetros no Aterro Sanitário Intermunicipal de Angra do Heroísmo, na Ilha Terceira*. Relatório de Execução de um Furo. Ericeira.

Sondagens Batalha, 2009. *Relatório de Execução de 4 furos de Pesquisa e Captação de Água Subterrânea em Angra do Heroísmo, na Ilha Terceira; SB3 Furo – Achada*. Relatório de Execução de um Furo. Ericeira.

Sondagens Batalha, 2009. *Relatório de Execução de 1 Furo de Pesquisa e Captação de Água Subterrânea Nas Fajãs da Agualva, Ilha Terceira; SB1 Furo – Fajãs da Agualva*. Relatório de Execução de um Furo. Ericeira.

Teixeira, L., Urish, D., Frohlich, R.K., Rodrigues, F., 2006. *Geo-Electrical Groundwater Exploration on a Volcanic Island: Terceira, Azores Islands*. SEG 2006 Geophysics Workshop. Vancouver.

Urish, D.W. and Frohlich, R.K., 1990. *Surface electrical resistivity in coastal groundwater exploration*. *Geoexploration* 26, 267 – 289.

Urish, D.W., 1981. *Electrical Resistivity-Hydraulic Conductivity Relationships in Glacial Outwash Aquifers*. *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 5, 1401 – 1408.

Van Nostrand, R.G. and Cook, K.L., 1966. *Interpretation of resistivity data*. *Geol. Surv. Prof. Pap.* 499, 310.

Waxman, M.H. and Smits, L.G.M., 1968. *Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands*. *Trans. Soc. Petrol. Eng.* 243, 107 – 122.

Zhadnov, M.S. and Keller, G.V., 1994. *The geoelectrical methods in geophysical exploration*. Elsevier Science. ISBN 0-444-89678-3.

